www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

3e JAARGANG NUMMER 6 JUNI 1938

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

ELECTRISCHE VERSCHIJNSELEN IN DE POSITIEVE ZUIL BIJ LAGE DRUK

door W. UYTERHOEVEN. 537.525

Na een kort overzicht van de ontsteking van een zelfstandige ontlading en van de overgang van glim- in boogontlading, wordt de stationnaire toestand der positieve zuil nader besproken; verder het ladingstransport door electronen en ionen, met de daarbij optredende lichtproductie en ionisatie ter vervanging van het verlies aan geladen deeltjes door de wandstroom. De stroomdichtheid over de doorsnede is niet uniform, maar heeft een maximum in de as. De invloed van deze stroomverdeeling op aanslag en ionisatie wordt nagegaan voor de natrium- en lage druk kwikontlading.

Inleiding

Zooals bekend bestaat de electrische stroom in een geleider uit een transport van deeltjes, electronen en ionen, die één of meerdere elementaire ladingen dragen [1]). Bij de metalen zijn aan de atomen één of meer electronen onttrokken, die zich in het metaal vrij bewegen kunnen (geleidingselectronen). De overblijvende positieve ionen zijn, afgezien van de mogelijkheid van trillende bewegingen om hun evenwichtstand tengevolge der warmte-energie, vast aan hun plaats gebonden en vormen het rooster. Legt men aan de uiteinden van een draad een spanningsverschil, dan verplaatsen de talrijke geleidingselectronen (aantal per cm^3 bijv. $n_e = 6 \cdot 10^{22}$ per cm^3 voor zilver) zich tengevolge van hun negatieve lading in de richting van de positieve pool, de anode. In de stationnaire toestand treden nu per sec aan de negatieve pool (kathode) evenveel electronen in de draad, als er aan de anode uitgaan. Daar de positieve ionen van het rooster zich niet verplaatsen kunnen, dragen zij ook niet bij tot de stroom.

Bij een electrolyt zijn zoowel de positieve als de negatieve deeltjes bewegelijk. Onder invloed van een electrisch veld verplaatsen zich de positieve ionen naar de kathode, de negatieve deeltjes, die hier geen vrije electronen maar negatieve ionen zijn, naar de anode. Ook hier zijn de geladen deeltjes onder normale omstandigheden reeds aanwezig, zonder dat een electrisch veld aangelegd wordt; dit laatste doet niets anders dan de ladingen in een bepaalde richting in beweging brengen.

Een isolator of niet-geleider bevat in normale toestand geen ladingen, die zich vrij bewegen kunnen. Brengt men deze er op een of andere wijze in, dan wordt de niet-geleider tot geleider: zoo bijv. een vacuumruimte, waarin door middel van een gloeikathode electronen gebracht worden (radiolamp). Hetzelfde middel zou men kunnen toepassen in een gas, dat onder normale omstandigheden een isolator is. Er bestaat echter nog een andere mogelijkheid om een gas geleidend te maken. Daarbij worden onder invloed van het aangelegde electrische veld de ladingen in het gas voortgebracht door ionisatie. Dit is het verschijnsel van de doorslag, dat we kort zullen bespreken.

Ontsteking van een zelfstandige ontlading

Legt men aan de klemmen van een gloeilamp een spanning, die bijv. de helft bedraagt van de normale bedrijfsspanning, dan loopt er een stroom, die van de orde van grootte van twee derde van de bedrijfsstroom is. De ladingen, die de stroom veroorzaken, waren immers reeds in de draad aanwezig, hun stroomingssnelheid is echter bij de geringere veldsterkte kleiner dan bij de normale bedrijfsspanning, zoodat het aantal, dat per sec

[1]) De elementaire lading, die gelijk is aan de lading van een electron, bedraagt: $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ e.s.e. $= 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ coulomb. Een éénwaardig positief ion is een atoom, waaraan één electron onttrokken is, bij een tweewaardig positief ion zijn er twee electronen onttrokken. Een éénwaardig negatief ion is een atoom, dat één electron teveel gebonden heeft, enz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

door elke draaddoorsnede stroomt, d.w.z. de electrische stroom, ook kleiner is.

Legt men op dezelfde wijze de halve bedrijfsspanning aan een gasontladingslamp, dan gebeurt er oogenschijnlijk niets, d.w.z. met de gewone amperemeter meet men geen merkbare stroom. In feite loopt er toch een zeer kleine stroom, zooals men met een galvanometer kan aantoonen. Tengevolge van doordringende straling (radio-actieve en kosmische) worden er in het gas onophoudelijk per cm^3 en per sec. enkele ionen gevormd. Deze stralen zijn nl. in staat uit een atoom een electron vrij te maken, waardoor tevens een positief ion ontstaat. In de lucht wordt een dergelijk electron spoedig, tengevolge der aanwezige zuurstof die negatieve electronen gemakkelijk bindt, tot een negatief ion, dat zich vroeger of later met een positief ion vereenigt (recombinatie), waardoor de vrije ladingen weer verdwijnen. In een zuiver edelgas echter, waar geen negatieve ionen optreden, blijven de electronen veel langer vrij. Treedt nu een dergelijke natuurlijke ionisatie op in een edelgas tusschen twee platen, die zich op verschillende potentiaal bevinden, dan zullen de electronen zich naar de anode, de positieve ionen zich naar de kathode bewegen, met andere woorden er loopt een stroom door het gas. *Fig. 1* geeft het verloop van de stroom tusschen de platen met toenemend spanningsverschil. Bij deze meting werd de ionisatie teweeggebracht door bestraling met röntgenstralen, waarbij grootere stroomen kunnen optreden dan bij de ionisatie door kosmische of radioactieve straling.

De kromme van fig. 1 bestaat uit drie deelen. Bij zeer kleine spanningen V stijgt de stroom en bereikt bij ongeveer 20 V een verzadigingswaarde:

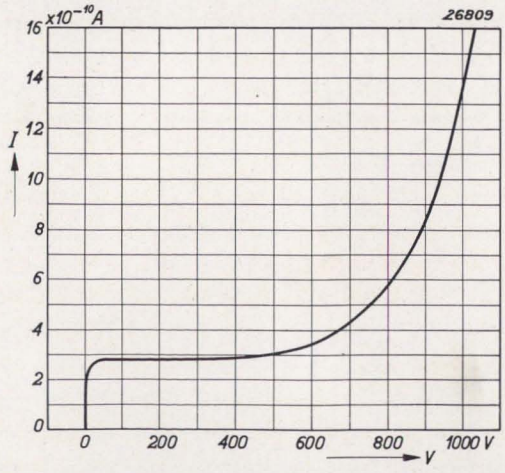


Fig. 1. Verloop van de stroom als functie van de spanning tusschen twee evenwijdige groote vlakke platen (diameter 80 mm, afstand 24 mm) bij hulpionisatie door röntgenstralen in het gas. (Argon bij 27,6 mm druk).

alle in het gas gevormde ladingen komen dan aan de electroden, er is dus geen recombinatie in het gas of aan de wand. Laat men de spanning verder toenemen, dan blijft de stroom eerst constant, maar begint bij ongeveer 400 V langzaam, dan sneller op te loopen. Deze stroomtoename is nu daaraan te danken, dat de onder invloed van het electrische veld zich bewegende electronen zelf nieuwe ionisatie in het gas veroorzaken.

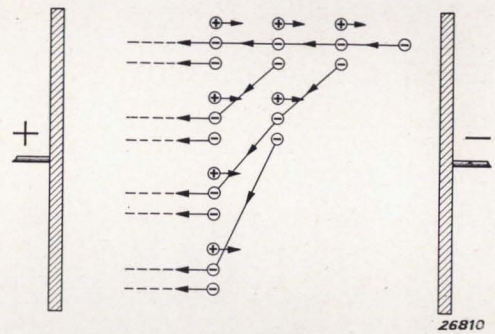


Fig. 2. Schematische voorstelling van een electronenlawine.

In het electrische veld neemt de energie van de zich naar de anode bewegende electronen toe. Zoolang hun kinetische energie kleiner is dan de aanslagenergie van de edelgasatomen, kunnen zij bij de botsing met deze laatste slechts een zeer geringe fractie van hun energie afgeven, van de orde van grootte van 0,01%. Tusschen opeenvolgende botsingen krijgen de electronen dus meer en meer energie, tot zij tenslotte in staat zijn de atomen aan te slaan of te ioniseeren. Een electron, dat in de nabijheid van de kathode vrijgemaakt is, zal dan op zijn weg naar de anode een aantal electronen produceeren, die elk op hun beurt na versnelling in het veld ook ioniseeren kunnen (*fig. 2*). Men heeft aan dit verschijnsel de sprekende naam „electronenlawine" gegeven. Het zal des te gemakkelijker optreden, naarmate de veldsterkte grooter is.

Onderbreekt men de bestraling met röntgenstralen, dan kan het gebeuren, dat de stroom weder zeer klein wordt: men heeft dan met een „onzelfstandige ontlading" te maken, die zonder hulpionisatie niet bestaan kan. Is de aangelegde spanning echter voldoende hoog, dan heeft het wegnemen der hulpionisatie geen invloed meer en heeft men te doen met een „zelfstandige ontlading". Dat een dergelijke ontlading zelfstandig kan blijven bestaan, is te danken aan de werking der positieve ionen, die bij het treffen op de kathode electronen daaruit vrij kunnen maken, gemiddeld bijv. ongeveer één electron per 20 ionen. Is nu de veldsterkte en bij gevolg de ionisatie zoo groot, dat er voor elk electron, dat de kathode verlaat, 20 ionen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

op deze aankomen, dan kan er opnieuw een electron vrijgemaakt worden. Op zijn beurt zorgt dit weer, dat er 20 ionen op de kathode terechtkomen, met andere woorden het proces onderhoudt zichzelf en we hebben een „zelfstandige ontlading". Het is duidelijk, dat dit verschijnsel bij des te lagere veldsterkte (geringer aantal ionisaties) zal optreden, naarmate de electronen gemakkelijker uit de kathode vrijgemaakt worden. Een buis, waarvan de kathode met een barium-bariumoxyde laag bedekt is, welke gemakkelijk electronen afgeeft, zal dus lichter ontsteken dan een met een ijzerkathode.

Overgang van glim- naar boogontlading

Heeft men, zooals in bovenstaand voorbeeld aangenomen is, koude kathoden, dan kan de voorschakelweerstand zoodanig gekozen worden, dat de zelfstandige ontlading als zg. „normale glimontlading" optreedt. Deze is daardoor gekenmerkt, dat de ontlading de kathode niet geheel bedekt en aan deze electrode een spanningssprong (100 - 200 V) de zg. „normale kathodeval" optreedt. In *fig. 3* is een karakteristiek, d.i. de spanning aan de klemmen der buis V_l als functie van de stroom I_l, schematisch weergegeven, waarbij de ontladingsbaan zoo kort gedacht is, dat het spanningsverval in het kathodegebied practisch gelijk aan V_l is.

In het gebied der normale glimontlading, AB in fig. 3, is de stroomdichtheid op het bedekte deel der kathode constant voor een gegeven kathodemateriaal en gasvulling. Neemt de stroom I_l toe, dan wordt het met glimlicht bedekte deel van de kathode grooter, terwijl de kathodeval V_k constant blijft. Dit gaat door tot de kathode volledig bedekt is (punt B). Wil men I_l nog verder opvoeren, dan neemt met de stroomdichtheid tevens de kathodeval toe, men heeft dan een zg. „abnormale kathodeval".

Tegenwoordig hebben slechts weinig gasontladingslampen een koude kathode (practisch alleen de neonlicht-reclamebuizen en -glimlampen), de meeste hebben een gloeikathode, die door de ontlading op temperatuur gebracht en gehouden wordt. Bij de ontsteking ontstaat nu eerst een glimontlading, die vanzelf in een boogontlading moet overgaan. Zulk een „boogontlading" wordt gekenmerkt door een lage kathodeval, 10 - 20 V, welke gemakkelijk verkregen wordt met behulp van een gloeiende kathode, waarvan het oppervlak met een goed electronen-emitteerende laag (barium-bariumoxyde) bedekt is.

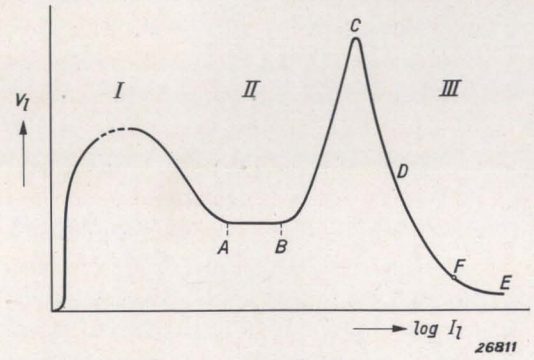


Fig. 3. Schematische voorstelling van de spanning-stroomkarakteristiek voor een ontlading tusschen vlakke platen. De drie gebieden correspondeeren: *I* met doorslag, *II* met normale glimontlading en *III* met boogontlading.

Ten slotte willen we aan de hand van het schema van fig. 3 nog kort de overgang van glim- naar boogontlading bespreken. Is de voorschakelweerstand zóó gekozen, dat de ontlading niet in het gebied der normale glimontlading AB gestabiliseerd wordt, dan zal de stroom verder toenemen en bij het abnormaal worden van de kathodeval ook de spanning V_k. Het energieverlies in het kathodegebied $I_l\,V_k$, waarvan een groot gedeelte aan de kathode afgegeven wordt, kan zoo belangrijk worden, dat deze laatste gaat gloeien en thermisch electronen uitzenden (c in fig. 3). Het aantal ionen, dat noodig is om de electronen uit de kathode vrij te maken, wordt dan belangrijk minder en de kathodeval daalt tot 10 - 20 V (Deel DE der karakteristiek in fig. 3). Door doelmatige keuze van het voorschakelapparaat kan men de ontlading weer in een willekeurig punt der karakteristiek bijv. F stabiliseeren.

Deze overgang van glim- naar boogontlading, de zoogenaamde omslag, wordt, evenals de doorslag, in de gasontladingslampen vergemakkelijkt doordat de electroden met een goed electronen emitteerende laag bedekt worden. De temperatuur, waarbij een gegeven electronenemissie bereikt wordt, ligt dan lager. Daarenboven zijn de electroden zoo klein gedimensioneerd, dat zij met een betrekkelijk gering vermogen snel op de benoodigde temperatuur gebracht en gehouden worden.

Stationnaire toestand van de positieve zuil. Rol van de ionisatie

Bij de ontlading, waarvan in fig. 3 de karakteristiek gegeven is, werd de lengte van de ontladingsbaan kort ondersteld, zoodat alleen de vlak bij de kathode optredende verschijnselen een belangrijke rol spelen. Neemt men echter een veel langere ontladingsbaan, zooals bijv. een neonlicht-reclamebuis, dan worden de verschijnselen aan de electroden relatief minder belangrijk. Het lange ontladingsdeel, dat het gebied in de omgeving van de kathode met dat in de nabijheid van de anode verbindt, de zg. positieve zuil, bepaalt dan het karakter van de ontlading.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

In de eerste plaats kan men zich nu afvragen, hoe de geleiding in dit ontladingsdeel tot stand komt. Daarbij nemen we eenvoudigheidshalve aan, dat de ontlading in een edelgas bij lage druk (<5 cm Hg) en gelijkstroom plaats heeft. Uit het kathodegebied komen een groot aantal electronen, die zich onder invloed van het electrische veld in de richting naar de anode bewegen. Waren er alleen electronen in het gas, dan zouden deze een belangrijke ruimtelading en een sterk potentiaalverval te voorschijn roepen. Men zou dan meerdere honderden volts noodig hebben, om een eenigszins belangrijke stroom door de positieve zuil te voeren, terwijl in werkelijkheid de veldsterkte meestal enkele V bedraagt. De negatieve ruimtelading der electronen wordt echter door de aanwezige positieve ionen opgeheven. In elke cm³ is het aantal electronen, de concentratie n_e, practisch gelijk aan het aantal positieve ionen n_p [2]); de ruimtelading in de zuil is nagenoeg nul. Voor de concentraties n_e en n_p vindt men in zulk een zuil van lage druk waarden van ongeveer $n_e = n_p = 10^{10}/\text{cm}^3$. Bij een druk van bijv. 10 mm en een temperatuur van 300°C is de concentratie der neutrale atomen $n = 1{,}7 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$, zoodat één op de tien millioen atomen geioniseerd is.

Hoewel de concentraties der electronen en der ionen practisch gelijk zijn, is de stroom bijna geheel aan het ladingstransport door de electronen toe te schrijven. Dit is een gevolg van de veel grootere bewegelijkheid der electronen ten opzichte van die der ionen, onder overigens gelijke omstandigheden van veldsterkte en gasdruk. De bewegelijkheid, d.i. de verplaatsingssnelheid in de veldrichting bij de eenheid van veldsterkte, is evenredig met de gemiddelde vrije weglengte (de gemiddelde afstand tusschen twee opeenvolgende botsingen) en omgekeerd evenredig met de massa. Voor het electron is nu de gemiddelde vrije weglengte grooter en de massa belangrijk kleiner dan voor een positief ion. Zoodoende vindt men bijv. voor de beweeglijkheid K in neon van 1 mm druk en 0°C bij 1 V/cm voor de electronen $K_e = 1{,}4 \cdot 10^6$ cm/sec. en voor de ionen $K_p = 7{,}5 \cdot 10^3$ cm/sec. De stroomdichtheid in de buis is evenredig met de concentratie en de beweeglijkheid, volgens de formule $j_e = n_e \cdot K_e \cdot E$ (E = veldsterkte). Vergelijkt men de stroomdichtheid der electronen met die der ionen, dan is vanwege $K_e \gg K_p$ ook $j_e \gg j_p$. Al dragen nu de ionen bijna niet bij tot de electrische stroom, toch zijn zij onmisbaar, doordat zij de negatieve ruimtelading der electronen opheffen.

[2]) We veronderstellen, dat de ontlading plaats vindt in een edelgas, waarin men aanneemt, dat geen negatieve ionen optreden.

De geleiding in een geioniseerd gas is dus eenigszins analoog met die in een metaal, waarin ook de electronen zich tusschen positieve ionen door bewegen. Er is echter een belangrijk verschil, daar in een metaal de ionen van het rooster aan hun plaats gebonden zijn, terwijl zij zich in de positieve zuil bewegen kunnen. Zij verplaatsen zich naar de wand en gaan daar verloren door recombinatie met een electron van de negatieve wandlading, zoodat weer een neutraal atoom ontstaat. De ionen en electronen, die door recombinatie aan de wand verdwenen zijn, moeten door nieuwe vervangen worden, en dit gebeurt door de electronen in de gasmassa. De daarvoor benoodigde energie ontleenen deze aan het electrisch veld, dat tegelijk zorgt voor hun verplaatsing in de richting der anode.

Energieverdeeling van de electronen. Lichtemissie

Zooals bekend moet een electron, wil het bij botsing met een neutraal en niet aangeslagen atoom een ion kunnen vormen, minstens een kinetische energie gelijk aan de ionisatie-energie van het atoom hebben. De energie van een electron $^1/_2\, m_e v_e^2$ bepaalt men meestal door het potentiaalverschil (in V) aan te geven, dat het doorloopen moet om de gegeven energie te verkrijgen, $^1/_2\, m_e v_e^2 = eV_e$. Voor een 5 V electron bijv. is dus de energie: $eV_e = 4{,}80 \cdot 10^{-10}$ (E.S.E.) $\cdot$ 5/300 (E.S.E.) $= 8 \cdot 10^{-12}$ erg $= 8 \cdot 10^{-19}$ W sec., terwijl $v_e = 1{,}33 \cdot 10^8$ cm/sec. bedraagt. Niet alle electronen hebben een energie, die voor de ionisatie van de neutrale atomen toereikend is, er bestaat in de positieve zuil een zg. Maxwellsche snelheidsverdeeling, waarvan *fig. 4* een grafische voorstelling geeft. Als ordinaat is daar uitgezet de fractie der

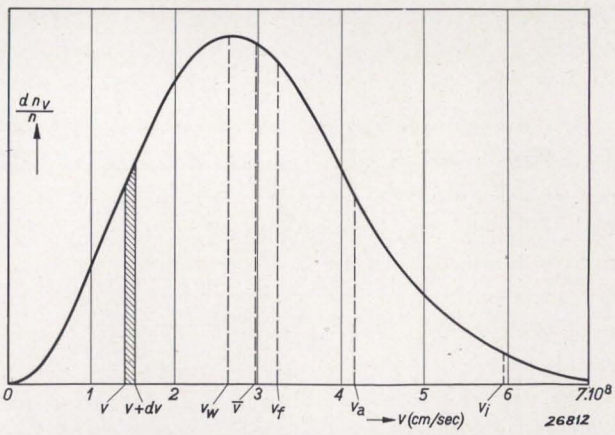


Fig. 4. Maxwellsche snelheidsverdeeling der electronen. De ordinaten geven de fractie dn_v/n der electronen, die een snelheid tusschen v en $v + dv$ hebben. v_w = meest voorkomende, $\bar{v}$ = gemiddelde en v_f kwadratisch gemiddelde snelheid. (De gemiddelde energie komt in dit voorbeeld overeen met een spanning van 5 V, $^1/_2\, m_e v_f^2 = e\bar{V}_e$, waarbij $\bar{V}_e = 5$ V.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

electronen, die een snelheid tusschen v en $v+dv$ hebben (gearceerd oppervlakje) als functie van v. Men ziet, dat er slechts weinig electronen zijn, die een zeer groote of een zeer kleine snelheid hebben, de meeste hebben een snelheid, die in de buurt van de meest voorkomende waarde v_w ligt, bij het maximum der kromme. In fig. 4 zijn verder nog aangegeven de gemiddelde $\bar{v}$ en kwadratisch gemiddelde $\sqrt{\overline{v^2}} = v_f$ (snelheid). Ook zijn aangeduid de snelheden v_a en v_i van een electron, dat een energie gelijk aan de aanslag- ($eV_a = {}^1/_2\, m_e v_a^2$) en ionisatie-energie ($eV_i = {}^1/_2\, m_e v_i^2$) der gasatomen heeft. Hierbij is aangenomen voor de aanslagspanning $V_a = 7$ V, voor de ionisatiespanning $V_i = 10$ V, terwijl de gemiddelde energie der electronen $\bar{V}_e = 5$ V (${}^1/_2\, m_e \overline{v_e^2} = e\bar{V}_e$).

Zijn er in de positieve zuil electronen, die voldoende energie hebben om te ioniseeren, dan zal er ook aanslag optreden, daar de aanslagspanning V_a kleiner dan de ionisatiespanning V_i is. De lichtemissie, het gevolg van het aanslaan der atomen, hoe belangrijk ook voor het verlichtingsvraagstuk, is dus slechts een bijproduct van het ontladingsmechanisme. Zorgt men, dat het ionenverlies uit de ontladingsbaan gering wordt door een wijde diameter en een geschikte gasdruk te kiezen, dan kan men een zg. lichtlooze zuil, d.w.z. een zuil waardoor een sterke stroom gaat en die toch bijna geen licht geeft, verkrijgen. Daar hier practisch geen ionisatie ter vervanging van verdwenen ionen optreedt, blijft de gemiddelde electronensnelheid en ook de aanslag van het gas gering. Dergelijke ontladingen hebben een kleine veldsterkte, daar deze slechts voor de verplaatsing der electronen zorgen moet, waarbij alleen de zeer kleine energieverliezen tengevolge van de elastische botsingen der electronen met de atomen optreden.

Mechanisme der zuilontlading. Wandstroom

Het voorgaande samenvattende komen we tot het volgende beeld van de positieve zuil. Een wolk van electronen, waarvan de snelheden door een Maxwellsche verdeeling gegeven zijn, verplaatst zich onder invloed van het electrische veld in de richting naar de anode. De individueele snelheden der electronen kunnen daarbij een willekeurige richting hebben, daar na het afleggen van een vrije weglengte, waarbij de snelheid in de richting van het veld toeneemt, weer een botsing met een atoom volgt, zoodat de snelheid telkens van richting verandert. Door de werking van het electrische veld ontstaat er echter een resulteerende snelheid in de richting naar de anode.

Terwijl de wolk zich verplaatst, winnen de electronen energie, die in de stationnaire toestand juist gelijk is aan het energieverlies tengevolge van elastische botsingen, aanslag en ionisatie. Over de geheele lengte van de zuil blijft daardoor de gemiddelde energie constant.

Vergeleken met de electronen kunnen de ionen bijna als stilstaand beschouwd worden. Ze beschrijven echter gekromde banen, die ontstaan doordat ze zich op hun weg naar de wand ook eenigszins in de richting der kathode verplaatsen. We zullen nu de zijdelingsche beweging der ionen, die het verlies aan positieve ladingen veroorzaakt, even nader beschouwen.

Brengt men in een gasmassa, bijv. atmosferische lucht in een kamer, op een gegeven plaats een bijmengsel, bijv. chloor, dat gemakkelijk aan de reuk herkenbaar is, dan blijkt, dat na korte tijd het chloor zich over de heele ruimte verspreid heeft. Dit is een gevolg van de zg. diffusie, waardoor de concentratieverschillen vereffend worden. De diffusie gaat des te sneller, naarmate de bijgevoegde deeltjes grootere vrije weglengte en snelheid bezitten. Brengt men nu in een edelgasatmosfeer plaatselijk een even groot aantal electronen en ionen, dan zullen de eersten sneller wegdiffundeeren. De achterblijvende ionen zullen echter door de electrische aantrekking de electronen in hun diffusie remmen, en omgekeerd zullen de vooruitijlende electronen de ionen in hun diffusie versnellen.

Iets dergelijks gebeurt nu ook in de positieve zuil: de electronen diffundeeren sneller uit het midden der ontladingsbaan weg en sleepen de langzamere ionen mee. Zij vinden nu de wand op hun weg en laden deze negatief op, waardoor deze de ionen aantrekt en de electronen afstoot. Deze negatieve oplading gaat nu zoover tot gemiddeld de ionen zooveel versneld en de electronen zooveel vertraagd worden, dat er per tijdseenheid evenveel positieve als negatieve ladingen op de wand aankomen. Dan is een stationnaire toestand ontstaan, waarbij de in gelijke getallen aankomende ladingen door recombinatie aan de isoleerende wand verdwijnen. Het hier beschreven verschijnsel draagt de naam van ambipolaire diffusiestroom.

Het potentiaalverloop langs een straal loodrecht op de as van een buis is in *fig. 5a* gegeven. Van de as uitgaande neemt de potentiaal eerst langzaam en in de nabijheid van de wand sneller af [3]). Daardoor

[3]) Slechts in de punten op de as geldt strikt, dat $n_e = n_p$ is; de veldsterkte is daar langs de as gericht en heeft geen componente in radiale richting. In de andere punten is n_p iets grooter dan n_e, het verschil is echter zoo gering, dat het in de meeste beschouwingen verwaarloosd mag worden. Per cm lengte van de buis is de som van negatieve wandlading en positieve ruimtelading juist nul.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

worden dus de ionen versneld, de electronen geremd in hun beweging naar de wand, slechts de snelste onder de electronen kunnen deze bereiken, de langzamere worden gereflecteerd en keeren naar het midden der ontladingsbaan terug.

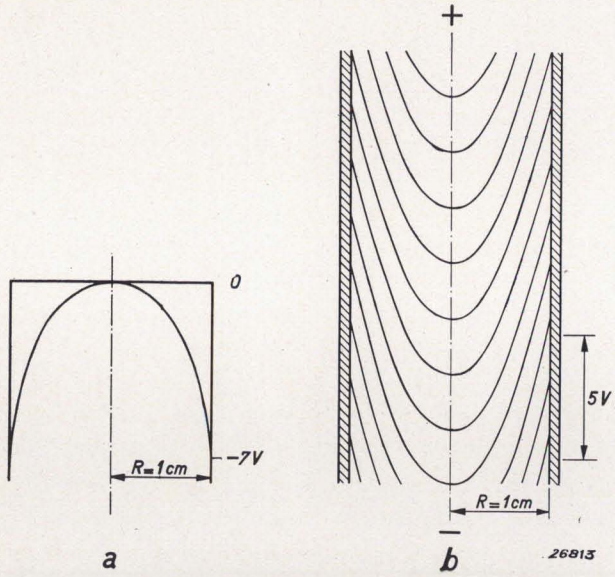


Fig. 5. *a*) Potentiaalverloop langs de straal. *b*) Verloop der aequipotentiaalvlakken.

Fig. 5b geeft het schematisch verloop der aequipotentiaalvlakken.

Eenvoudigheidshalve wordt hier verondersteld, dat er in de zuil geen striae optreden, zooals vaak bij de edelgassen het geval is. De staande striae herkent men aan de afwisselend lichte en donkere deelen der ontlading. De veldsterkte, de energie en de concentratie van de electronen vertoonen dan periodische fluctuaties. Ook kunnen er loopende striae optreden, die met behulp van een draaiende spiegel waargenomen kunnen worden.

Stroomverdeeling in de doorsnede

Daar de potentiaal van de as naar de wand toe afneemt, zullen de langzamere electronen niet tegen het vertragend veld in kunnen loopen en zal de concentratie n_e, en ook n_p, in de richting van de wand verminderen. Het verloop der concentratie als functie van de afstand tot de as kan op de volgende wijze afgeleid worden.

Uit de ontladingsbuis snijden we een stuk van 1 cm lengte en beschouwen een klein volumen, dat begrensd is door twee concentrische cylinders met slechts weinig verschillende stralen r en $(r + dr)$, en door twee vlakken loodrecht op de as (*fig. 6*). In de stationnaire toestand moeten er in dit elementaire volumen evenveel ladingen binnen komen als er uitgaan, daar op goede gronden aangenomen wordt, dat er geen ladingsverlies door recombinatie in het gas plaats heeft. Verder is de stroom in alle doorsneden der buis dezelfde, zoodat er in de lengterichting evenveel ladingen door het eene vlak binnentreden als er door het andere uitgaan. Dit

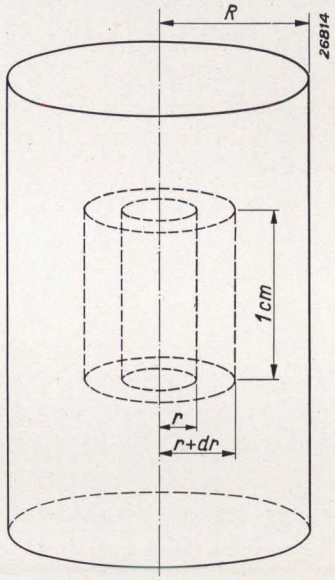


Fig. 6. Volume-element tusschen concentrische cylinders met straal r en $r + dr$.

geldt zoowel voor de electronen als voor de ionen. Het is dus voldoende het ladingstransport door de cylindermantel te beschouwen.

In de richting loodrecht op de as gebeurt dit ladingstransport door de bovenbeschreven ambipolaire diffusiestroom, waarbij per sec evenveel electronen als ionen door een cylindermantel gaan, daar de resulteerende stroom vanwege de isoleerende wand nul moet zijn. Het aantal deeltjes, dat door 1 cm² van het cylinderoppervlak stroomt, is evenredig met het concentratieverval langs de straal dn_e/dr en met de zg. diffusieconstante D. Deze laatste hangt af van de snelheid $\bar{v}$ en de gemiddelde vrije weglengte λ, zoowel voor de electronen als voor de ionen; hoe grooter deze waarden zijn des te sneller gaat de diffusie. Voor het binnencylinderoppervlak vinden we dus voor het aantal binnenkomende electronen: $- D\, 2\, \pi\, r \cdot 1 \cdot \left(\frac{\mathrm{d}\, n_e}{\mathrm{d}r}\right)_r$ [4]). Op dezelfde wijze komt er voor het aantal door de buitencylindermantel uittredende electronen: $- D\, 2\, \pi\, (r + \mathrm{d}r) \cdot \left(\frac{\mathrm{d}\, n_e}{\mathrm{d}r}\right)_{r + dr}$. Het verschil van deze beide uitdrukkingen geeft het aantal deeltjes,

[4]) Deze uitdrukking is, niettegenstaande het $-$teeken, in werkelijkheid positief, daar $\frac{dn_e}{dr} < 0$ is (n_e neemt af met toenemende r).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

dat er per saldo door diffusie meer uit het beschouwde volumen gaat, dan er inkomt. Dit aantal moet nu gelijk zijn aan het aantal van de door ionisatie nieuw gevormde. Het aantal ionisaties is evenredig met

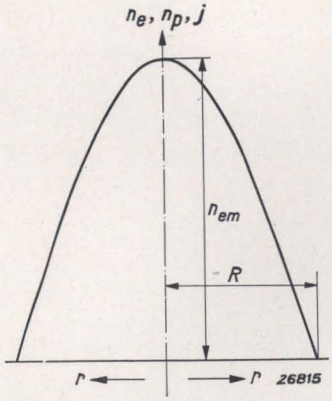


Fig. 7. Verloop van electronenconcentratie n_e, ionenconcentratie n_p en stroomdichtheid j als functie van de afstand r tot de as.

de electronen-concentratie n_e en met het aantal botsingen tusschen electronen en atomen; verder neemt het toe met de gemiddelde energie der electronen. Noemen we z het aantal nieuwe electronen, dat gemiddeld per electron per sec gevormd wordt, dan is het aantal ionisaties in de cylinderring per sec: $2\,\pi\,r\,dr \cdot z \cdot n_e$. Dit moet nu gelijk zijn aan het boven bepaalde verlies door diffusie. Daaruit kan men onderstaande differentiaalvergelijking afleiden, die als afhankelijke veranderlijke de concentratie n_e en als onafhankelijke de afstand r tot de as, en verder slechts bekende grootheden bevat.

$$\frac{d^2 n_e}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\,n_e}{dr} + \frac{z}{D}\,n_e = 0$$

Voert men in deze vergelijking de nieuwe veranderlijke $x = r\sqrt{z/D}$ in, dan krijgt men een differentiaalvergelijking, waarvan een oplossing, die voor $x = 0$ (in de as) eindig is, gegeven wordt door de z.g. Besselfunctie van de nulde orde

$$n_e = n_{em}\,J_0\,(x).$$

n_{em} is de concentratie der electronen in de as. De functie $J_0\,(x)$ is nul voor $x = 2{,}405$ en daar aan de wand voor $r = R$, $n_e = 0$ aangenomen wordt, kan men schrijven: $2{,}405 = R\sqrt{z/D}$, waaruit volgt: $\sqrt{z/D} = 2{,}405/R$. Voor de concentratie n_e als functie van r vindt men dus:

$$n_e = n_{em}\,J_0\,(r\sqrt{z/D}) = n_{em}\,J_0\left(2{,}405\,.\,\frac{r}{R}\right).$$

Het verloop van n_e als functie van r wordt in *fig. 7* gegeven. Daar de veldsterkte in de richting van de as over de geheele doorsnede dezelfde is, en de stroomdichtheid evenredig is met de concentratie n_e, stelt de kromme van fig. 7 ook het verloop van de stroomdichtheid als functie van de straal voor.

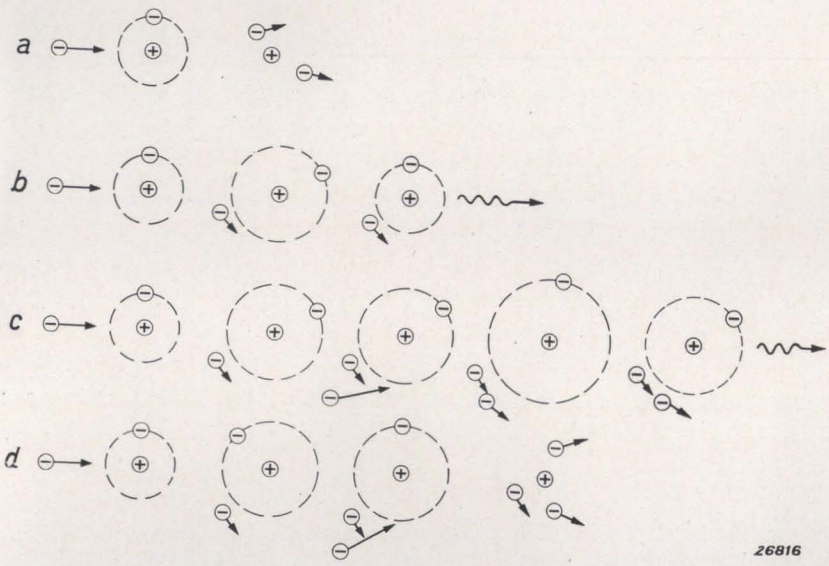


Fig. 8. Schematische voorstelling van aanslag en ionisatie door electronenstooten: *a*) ionisatie in één stoot, *b*) aanslag in één stoot met daaropvolgende lichtuitzending, *c*) cumulatieve aanslag door twee opeenvolgende stooten met daarop volgende lichtuitzending, *d*) cumulatieve ionisatie door twee opeenvolgende stooten.

Invloed der stroomverdeeling op ionisatie en aanslag

Hoewel het resultaat der boven gegeven afleiding zeer goed door de metingen bevestigd wordt, kan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

zij toch slechts in eerste benadering juist zijn, daar alle zg. cumulatieve effecten verwaarloosd werden. Een voorbeeld daarvan vindt men in de trapsgewijze ionisatie. Wordt een atoom door een botsing

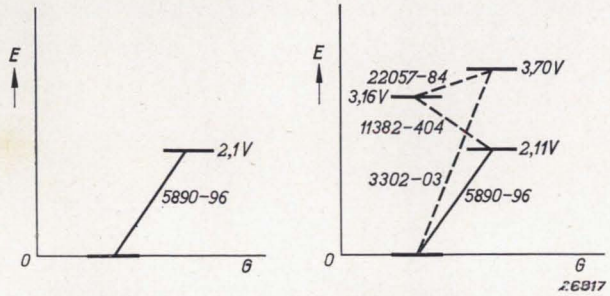


Fig. 9. Vereenvoudigd schema van het natriumspectrum. Wordt alleen het 2,1 V niveau aangeslagen dan worden ook alleen de gele lijnen met $\lambda = 5890$-5896 Å uitgezonden. Bij aanslag van het 3,7 V-niveau worden ook lijnen buiten het zichtbare spectrum uitgezonden. G = Grondtoestand.

met een electron in een aangeslagen toestand gebracht, dan zal het in het algemeen de opgenomen energie als straling weer afgeven. Het blijft echter een zeer korte tijd in de aangeslagen toestand, meestal ongeveer 10^{-8} sec. Is nu de stroomdichtheid j der ontlading, en dus ook de electronenconcentratie n_e groot, dan zal het aangeslagen atoom een niet te verwaarloozen kans hebben om in botsing te komen met een ander electron. Het resultaat van deze tweede botsing kan zijn, dat het atoom in een hooger aangeslagen toestand komt, of geïoniseerd wordt (*fig. 8*). De boven gemaakte onderstelling, dat het aantal ionisaties evenredig is met de concentratie n_e, is dan niet meer heelemaal juist. Het is wel duidelijk, dat een stroomverdeeling, zooals in fig. 7 aangegeven, waarbij de stroomdichtheid niet over de geheele doorsnede dezelfde is maar een maximum in de as heeft, het optreden van cumulatieve effecten bevordert.

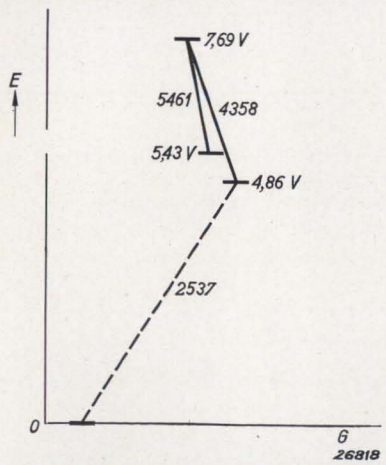


Fig. 10. Vereenvoudigd schema van het kwikspectrum. Aanslag van de blauwe kwiklijn met $\lambda = 4358$ Å en van de groene met $\lambda = 5461$ Å.

Voor de ionisatie is de gevonden stroomverdeeling beslist gunstig. Immers gebeurt de ionisatie in twee trappen, dan behoeft de energie der electronen niet minstens V_i te zijn, maar is een energie van V_a voldoende. Daardoor wordt het wegdiffundeeren der electronen naar de wand, dus ook dat der ionen, geringer, zoodat het ionenverlies en het aantal benoodigde ionisaties kleiner wordt. Afgescheiden hiervan, is het al een voordeel, dat de ionen hoofdzakelijk in de nabijheid van de as gevormd worden. De gemiddelde afstand, die de ionen moeten afleggen, voor ze de wand bereiken, wordt dan grooter en ook de tijd, gedurende welke ze in de ontlading blijven. We zagen, dat de rol der ionen bestond in het neutraliseeren der ruimtelading van de electronen ($n_e = n_p$); leeft elk ion gemiddeld langer, dan behoeven er per sec ook minder nieuwe geproduceerd te worden om n_p op peil te houden,

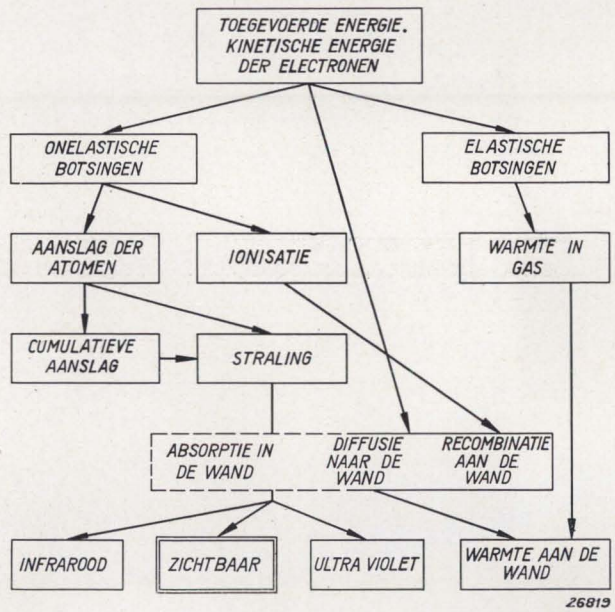


Fig. 11. Overzicht van de elementaire processen in de positieve zuil.

met andere woorden de energie, die aan ionisatie besteed wordt kan kleiner zijn.

Tenslotte mogen we niet vergeten, dat het bij de gasontladingslampen de bedoeling is, een maximale lichtemissie met een minimaal energieverbruik te verkrijgen. De energie, die daarbij aan ionisatie besteed wordt moet als een onvermijdelijk verlies beschouwd worden.

Of nu de stroomverdeeling van fig. 7 gunstig of ongunstig voor de lichtemissie is, hangt van de aard der toestanden af, die aangeslagen moeten worden. Gaat het om de resonantielijn (bijv. de gele natriumlijnen), die uitgezonden wordt, wanneer het atoom uit het dichtst bij de grondtoestand ge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

legen aangeslagen niveau naar de normale toestand terugkeert, dan is de stroomconcentratie in de as principieel ongunstig. Immers ze bevordert de aanslag van hooger gelegen niveaus, waardoor andere lijnen dan de gewenschte resonantielijn optreden (*fig. 9*). Bij natrium bijv. krijgt men dan lijnen in het onzichtbare deel van het spectrum: infrarood en ultraviolet, of lijnen, die met betrekking tot de ooggevoeligheidskromme minder gunstig liggen dan de gele lijn, met als gevolg vermindering van het rendement.

Gaat het echter om zg. hoogere lijnen, die ontstaan bij overgangen tusschen twee aangeslagen niveaux, dan is het bevorderen van cumulatieve effecten gewenscht. *Fig. 10* maakt dit duidelijk voor de groene (5461 Å) en blauwe (4358 Å) kwiklijnen. Het is bijv. voor de productie van de blauwe lijn voordeeliger, het atoom vanuit de 4,86 V toestand, waar het na uitzending der blauwe lijn is beland, dadelijk weer terug naar de 7,69 V toestand te brengen, dan eerst af te wachten, tot het atoom onder uitzending van de ultraviolette lijn 2537 Å naar de grondtoestand is teruggekeerd. In het eerste geval heeft men slechts $7{,}69 - 4{,}86 = 2{,}83$ V noodig, die geheel in het zichtbare gebied uitgestraald worden; in het tweede echter 7,69 V, waarvan slechts 2,83 V in zichtbaar licht omgezet worden.

Deze cumulatieve effecten worden nu bij kwik sterk bevorderd, doordat 4,86 V een „resonantieniveau" en 5,43 V een zg. „metastabiel niveau" is. Daar de lijn 2537 een resonantielijn is, wordt zij zeer gemakkelijk door de atomen in de grondtoestand geabsorbeerd. Na ongeveer 10^{-7} sec volgt dan weer emissie en de uitgestraalde energie kan weer door een ander atoom in de grondtoestand geabsorbeerd worden. Dit proces wordt een zeer groot aantal malen herhaald, voordat de resonantiestraling de buis verlaat, waardoor de concentratie der atomen in de 4,86 V toestand sterk toeneemt, en daarmede de kans op cumulatieve aanslag vanuit dit niveau. Ook voor het metastabiele 5,43 V niveau is de kans op cumulatieve aanslag groot. Is het atoom door electronenstoot in het 5,43 V niveau gebracht, dan kan het niet gemakkelijk door uitzending van straling direct naar de grondtoestand terugkeeren; meestal gebeurt dit door stooten met andere atomen of electronen. De levensduur van een dergelijk metastabiel niveau is veel langer dan voor een gewone aangeslagen toestand en bedraagt ongeveer 10^{-4} sec, zoodat daardoor ook de kans op cumulatieve aanslag verhoogd wordt. Bij de lage druk kwikontlading, die in de blauwe lichtreclamebuizen gebruikt wordt, werkt de stroomconcentratie dus gunstig. Bij de hooge druk kwiklampen wordt, door het samensnoeren van de ontlading tot een smalle streep in de as, dit verschijnsel in nog sterkere mate opgewekt.

Tenslotte geeft *fig. 11* een schematisch overzicht van de diverse hier besproken processen, die in de positieve zuil optreden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

THERMOKRUISEN

door J. W. L. KÖHLER. 621.317.7.082.62

Besproken wordt in dit artikel de constructie en de werking van thermokruisen. Uitvoerig wordt nagegaan, welke factoren invloed uitoefenen op de gevoeligheid en de karakteristiek. De keuze van de galvanometer en de benaming van de thermokruisen worden nader toegelicht. Tenslotte wordt een overzicht gegeven van de Philips-thermokruisen.

Inleiding

Stuurt men een wisselstroom van zeer lage frequentie door een draaispoelmeter, welke het nulpunt in het midden van de schaal heeft, dan zal de meter op elk oogenblik de dan heerschende waarde van de stroom aanwijzen; de wijzer gaat dus met de frequentie van de wisselstroom heen en weer. Wordt de frequentie verhoogd, dan zal na een oogenblik van resonantie de uitslag kleiner worden en de wijzer tenslotte vrijwel geheel stilstaan, omdat het bewegende systeem van de meter de hooge frequentie niet volgen kan. Voor het meten van wisselstroomen is een draaispoelmeter dus niet geschikt. Dit kan alleen geschieden met een instrument, dat ongevoelig is voor de stroomrichting, omdat de wijzer zich dan op een bepaalde gemiddelde uitslag kan instellen. Aan deze voorwaarde voldoen dynamometers, weekijzerinstrumenten, gelijkrichtende meters en thermische instrumenten.

Bij thermische instrumenten wordt gebruik gemaakt van de warmteontwikkeling, die plaats vindt in een weerstand, wanneer deze door een stroom doorloopen wordt. Uit dit principe volgt direct, dat de stroomrichting niet van invloed op de uitslag kan zijn. Van de ontwikkelde warmte kan op verschillende manieren gebruik gemaakt worden.

a) Op één of andere wijze wordt de thermische uitzetting van de gloeidraad door een wijzer aangegeven.

b) De ontwikkelde warmte dient om een afgesloten hoeveelheid gas te verwarmen, waarbij de volumeverandering door de verschuiving van een vloeistofdruppel in een capillair wordt aangegeven.

c) Gemeten wordt de weerstandsverandering van een gloeidraad, die daartoe opgenomen is in een Wheatstonesche brug.

d) De verwarming van de gloeidraad wordt gemeten met een thermoelement, dat aan een gelijkstroommeter is aangesloten.

Deze laatste methode willen wij uitvoeriger behandelen.

Constructie en werking van thermokruisen

Het eerste meetinstrument volgens dit principe werd geconstrueerd door Klemencic. Dit bestaat uit twee draadjes van verschillend materiaal, die in het midden om elkaar geslagen, geknoopt, of gelascht worden (zie *fig. 1*); vandaar de naam

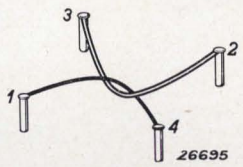


Fig. 1. Thermokruis van Klemencic. De draad van het ééne metaal is bevestigd aan de polen *1* en *4*, die van het andere metaal aan de polen *2* en *3*. In het midden zijn de draden op één of andere wijze electrisch verbonden. De te meten stroom gaat langs de polen *1* en *2*, de galvanometer is aangesloten tusschen de polen *3* en *4*.

thermokruisen. De te meten stroom wordt toegevoerd aan de klemmen *1* en *2*; door de warmteontwikkeling worden de draden in het midden warm, wat een thermospanning tusschen de klemmen *3* en *4* veroorzaakt. Deze spanning kan gemeten worden door een gevoelige meter op deze klemmen aan te sluiten.

Aan deze constructie zijn verschillende bezwaren verbonden, die verder zullen blijken. *Fig. 2* geeft

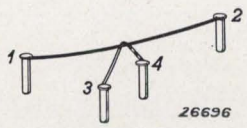


Fig. 2. Modern thermokruis. Tusschen de polen *1* en *2* is een gloeidraad uitgespannen, tusschen de polen *3* en *4* een thermoelement, waarvan de laschplaats op de gloeidraad bevestigd is.

een schets van de moderne thermokruisen, waaruit men kan zien, dat het principe van de bouw niet gewijzigd is. Tusschen de polen *1* en *2* is een gloeidraad uitgespannen. Midden tusschen de polen is op de gloeidraad een thermoelement bevestigd, met zijn laschplaats op, of dicht bij de gloeidraad. De uiteinden van het thermoelement zijn bevestigd aan de klemmen *3* en *4*, waartusschen de gelijkstroommeter aangesloten wordt. Het geheel wordt vaak geplaatst in een geëvacueerde ballon. Er zijn dan geen warmteverliezen door convectie, waardoor de gevoeligheid wordt verhoogd. Bij sommige constructies is het thermo-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

element electrisch met de gloeidraad verbonden, bij andere is het ervan geisoleerd. Deze constructie is niet zoo eenvoudig als de oorspronkelijke, maar er zijn vele voordeelen aan verbonden. Eén ervan is reeds direct duidelijk: Bij de keuze van het gloeidraadmateriaal behoeft niet op de thermoelectrische eigenschappen gelet te worden, waardoor de constructeur grootere vrijheid krijgt.

Wij willen nu de werking van het thermokruis nader bespreken. Indien door de gloeidraad met weerstand R_g een stroom i gestuurd wordt, zal in de gloeidraad de warmte $i^2\ R_g$ ontwikkeld worden. Hierdoor wordt de temperatuur van de gloeidraad verhoogd; de warmte wordt afgevoerd door geleiding langs de polen en over het thermoelement, en door straling. Als de hoeveelheid warmte, welke afgevoerd wordt, evenredig is met de temperatuurverhooging, zal deze evenredig zijn met de ontwikkelde warmte, dus met i^2. Dit is dan eveneens het geval met de temperatuur van de laschplaats van het thermoelement. Indien de thermospanning evenredig is met het temperatuurverschil, zal zij ook evenredig zijn met i^2, en hetzelfde geldt ook voor de stroom in de keten, die door het thermoelement en de galvanometer gevormd wordt, welke stroom evenredig is met de thermospanning. De uitslag van de galvanometer is dus evenredig met het kwadraat van de stroomsterkte in de gloeidraad.

Het verband tusschen de stroom door de galvanometer en de stroom door de gloeidraad noemen wij de karakteristiek van het thermokruis; deze is dus kwadratisch. Met een meter, die van een kwadratische schaalverdeeling voorzien is, kan dus, na ijking van één punt van de schaal, de primaire stroom direct afgelezen worden. Ook kan een meter met een lineaire schaal gebruikt worden; de aflezing is dan evenredig met i^2, dus met de warmte, die door de primaire stroom in een weerstand ontwikkeld kan worden; deze meting vindt in de practijk veel toepassing.

Mathematische behandeling

In korte trekken willen wij de mathematische behandeling van het thermokruis geven. Daartoe beschouwen wij eerst de gloeidraad alleen, dus zonder het thermoelement. Voor de temperatuurverhooging van een rechte draad, die tusschen twee punten uitgespannen is, en door een stroom verwarmd wordt, geldt de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{\sigma u}{\lambda q}\tau + \frac{A i^2 \varrho}{\lambda q^2} = 0 \quad \cdots \quad (1)$$

Hierin beteekenen:

x de lengtecoördinaat van de draad, gerekend vanaf het midden, in cm.
τ de temperatuurverhooging ten opzichte van de omgeving op de plaats x in graden.
u de omtrek van de draad, in cm.
q de doorsnede van de draad, in cm².
i de electrische stroom, in Amp.
A het electrisch warmteaequivalent, 0,2388 cal/Watt sec.
ϱ de soortelijke weerstand van de draad, in Ω cm.
σ de warmtestraling, in cal/cm² sec graad.
λ het soortelijk warmtegeleidingsvermogen, in cal/cm sec graad.

Vergelijking (1) kan als volgt afgeleid worden: Wij beschouwen van de draad een stukje ter lengte dx; aan de einden van dit element bestaan de temperatuurgradiënten $\left(\frac{d\tau}{dx}\right)_1$ en $\left(\frac{d\tau}{dx}\right)_2$. Door de warmtegeleiding wordt dus aan dit element toegevoerd de energie:

$$\lambda q\left[\left(\frac{d\tau}{dx}\right)_1 - \left(\frac{d\tau}{dx}\right)_2\right] = \lambda q\,\frac{d^2\tau}{dx^2}\,dx\,.$$

Door de stroom i wordt in het element ontwikkeld een warmtehoeveelheid $\frac{A i^2 \varrho}{q}\,dx$. Indien het element in vacuum is opgesteld, verliest het naar buiten alleen energie door straling; deze straling bedraagt $u\,\sigma\,\tau\,dx$; hierbij is aangenomen, dat de straling evenredig is met het temperatuurverschil, hetgeen geoorloofd is, als de temperatuurverhoogingen klein zijn (zie uitvoeriger beneden). In de stationnaire toestand moeten toegevoerde en afgevoerde energie aan elkaar gelijk zijn, dus:

$$\lambda q\,\frac{d^2\tau}{dx^2}\,dx + \frac{A i^2 \varrho}{q}\,dx = u\,\sigma\,\tau\,dx,$$

waaruit (1) volgt.

Bij deze afleiding is dus ondersteld, dat ϱ, λ en σ niet van de temperatuur afhangen; wij zullen later nagaan, wat er verandert, indien deze voorwaarde niet meer geldt.

Voert men als randvoorwaarden in, dat de temperatuurverhooging bij de polen ($x = \pm\, l/2$) nul is, dan is de oplossing van deze vergelijking:

$$\tau = \frac{A i^2 \varrho}{\sigma u q}\left\{1 - \frac{\cosh x\sqrt{\frac{\sigma u}{\lambda q}}}{\cosh\frac{l}{2}\sqrt{\frac{\sigma u}{\lambda q}}}\right\} \quad \cdots \quad (2)$$

$\cosh\alpha$ = cosinus hyperbolicus van α is de verkorte schrijfwijze van $^1/_2\,(e^{\alpha} + e^{-\alpha})$; de later voorkomende uitdrukking $\mathrm{tgh}\,\alpha$ (tangens hyperbolicus) beteekent $\frac{e^{\alpha} - e^{-\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}$. In *fig. 3a* is deze temperatuurverhooging voor verschillende punten van de gloeidraad geteekend.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

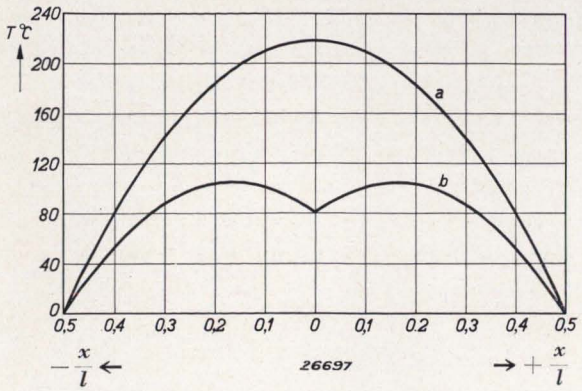


Fig. 3. *a*) Temperatuur van een uitgespannen draad, waardoor stroom vloeit.
b) Temperatuur van dezelfde draad, waarop in het midden een thermoelement bevestigd is.

In het midden is de temperatuurverhooging (t):

$$t = \frac{A i^2 \varrho}{\sigma u q}\left\{1 - \frac{1}{\cosh \frac{l}{2}\sqrt{\frac{\sigma u}{\lambda q}}}\right\} = \frac{A i^2 \varrho}{\sigma u q}\left\{1 - \frac{1}{\cosh K}\right\} \quad (3)$$

waarin $K = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{\sigma u}{\lambda q}} = l\sqrt{\frac{\sigma}{\lambda d}}$ voor ronde draden met diameter d. De temperatuurverhooging is dus inderdaad evenredig met i^2. Indien K klein is (dit is bij de meeste toepassingen het geval, zooals wij later zullen zien) kunnen wij schrijven:

$$\cosh K = 1 + K^2/2,$$

waardoor (3) overgaat in:

$$t = \frac{A i^2 \varrho l^2}{8 \lambda q^2} = \frac{A i^2}{8} \frac{\varrho l}{q} \frac{l}{\lambda q} = \frac{A i^2}{8} R_g R_w \quad (3a)$$

Hierin beteekenen R_g de electrische en R_w de warmteweerstand van de gloeidraad. In (3a) komt als gevolg van de benadering de stralingsconstante σ niet meer voor, hetgeen later van groot belang zal blijken.

Wij gaan nu over tot het geval, dat op het midden van de gloeidraad een thermoelement bevestigd is. Dit feit kan met goede benadering beschreven worden door in rekening te brengen, dat aan het midden van de gloeidraad een warmtehoeveelheid M per seconde en per graad temperatuurverhooging onttrokken wordt. De differentiaalvergelijking wordt dan ingewikkelder; wij geven hier slechts de uitkomst voor de temperatuurverhooging t_M van het midden van de draad:

$$t_M = \frac{A i^2 \varrho}{\sigma u q} \frac{1 - \frac{1}{\cosh K}}{1 + \frac{M \operatorname{tgh} K}{2\sqrt{\sigma \lambda u q}}} = \frac{t}{1 + \frac{M \operatorname{tgh} K}{2\sqrt{\sigma \lambda u q}}} \quad \cdots \quad (4)$$

De temperatuurverhooging is dus grooter, naarmate M kleiner is. De factor $\frac{\operatorname{tgh} K}{\sqrt{\sigma \lambda u q}}$ geeft rekenschap van het feit, dat de afgevoerde warmte naar het midden van de gloeidraad toestroomt vanaf nabij het midden gelegen deelen. Voor kleine K geldt

$$t_M = \frac{\frac{A i^2 \varrho l^2}{8 \lambda q^2}}{1 + \frac{l}{4 \lambda q} M} \quad \cdots \quad (4a)$$

Ook in dit geval is de temperatuurverhooging evenredig met i^2. De invloed van de warmtegeleiding is kleiner dan in (3a). Dit is duidelijk: Eerst was een groote temperatuurverhooging te bereiken door een groote warmteweerstand van de gloeidraad, nu is juist de warmteaanvoer naar het midden van de gloeidraad een belangrijk punt geworden. In *fig. 3b* geven wij een beeld van het temperatuurverloop langs de gloeidraad; het midden heeft nu niet meer de hoogste temperatuur.

Tenslotte moet de waarde van M nog uitgedrukt worden in de afmetingen en de constanten van het thermoelement. Hiervoor geldt weer een analoge differentiaalvergelijking, echter met andere randvoorwaarden. De oplossing luidt:

$$M_1 = \frac{\sqrt{\sigma_1 \lambda_1 u_1 q_1}}{\operatorname{tgh} K_1}, \quad \cdots \quad (5)$$

waarin de index 1 wijst op één der draden van het thermoelement. Voor de andere draad geldt dezelfde formule met de index 2; de lengte van de draden is $\frac{l_1}{2}$ en $\frac{l_2}{2}$; $K_1 = \frac{l_1}{2}\sqrt{\frac{\sigma_1 u_1}{\lambda_1 q_1}}$. De warmteafvoer door het geheele thermoelement is:

$$M = M_1 + M_2.$$

Bij een kleine waarde K_1 gaat (5) over in:

$$M_1 = \frac{2 \lambda_1 q_1}{l_1} \quad \cdots \quad (5a)$$

Indien wij de waarde van M in (4a) invoeren, wordt deze vergelijking:

$$t_M = \frac{\frac{A i^2 \varrho l^2}{8 \lambda q^2}}{1 + \frac{l}{2 \lambda q}\left\{\frac{\lambda_1 q_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 q_2}{l_2}\right\}} \quad \cdots \quad (4b)$$

De temperatuur van het midden van de gloeidraad is nu uitgedrukt in de afmetingen en de constanten van de draden van het thermokruis.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Wij bezien eerst de teller van (4b). Met weglating van de materiaalconstanten kunnen wij hiervoor schrijven: $t_M \sim \frac{i^2 l^2}{q^2} \sim i^2 R_g^2$. De afmetingen van de gloeidraad komen dus slechts voor in de vorm l/q; gloeidraden met verschillende afmetingen, doch gelijke weerstand, krijgen dus bij een gegeven stroom dezelfde temperatuurverhooging. Het spanningsverval, dat door de gloeidraad veroorzaakt wordt, $i R_g = V$, is niet afhankelijk van de afmetingen van de gloeidraad. Moet een bepaalde temperatuurverhooging bereikt worden met verschillende stroomsterkten, dan moet de weerstand van de gloeidraad omgekeerd evenredig met de stroomsterkte zijn. De energie, welke voor een bepaalde temperatuursverhooging noodig is, V^2/R_g, is omgekeerd evenredig met de weerstand, dus evenredig met de stroomsterkte; thermokruisen voor kleine stroomsterkten bezitten dus een grootere energiegevoeligheid dan die voor groote stroomsterkten.

Het bovenstaande is alleen juist, als in de noemer de tweede term ten opzichte van 1 verwaarloosd kan worden; dit is het geval bij kleine warmteafvoer door het thermoelement, of bij kleine $l/2\,\lambda\,q$. Dit laatste treedt steeds op bij thermokruisen voor grootere stroomsterkten ($i\ l/q$ moet immers constant zijn). Kan de tweede term niet verwaarloosd worden, hetgeen het geval is bij thermokruisen voor lage stroomsterkten, dan is de energiegevoeligheid kleiner. Een kleine warmteafvoer M door het thermoelement is dus gunstig. Daar λ_1 en λ_2 meestal gegeven zijn (de materiaalkeuze wordt bepaald door de thermoelectrische eigenschappen), kan deze bereikt worden door q_1/l_1 en q_2/l_2 klein te maken. De weerstand van het thermoelement $R_e = \frac{\varrho_1 l_1}{2\,q_1} + \frac{\varrho_2 l_2}{2\,q_2}$ wordt door deze maatregel echter groot; daardoor wordt aan het verkleinen van M een grens gesteld (zie beneden). De dimensies van het thermoelement komen alleen voor in de vorm q/l, zoodat draden met dezelfde electrische weerstand dezelfde warmteafvoer veroorzaken. Hierbij is steeds verondersteld, dat de straling verwaarloosd kan worden, dit is de kern van de hier gebruikte benadering.

Bij een bepaalde thermoelectrische combinatie gelden bovenstaande beschouwingen ook voor de thermospanning E_{th} (= thermo-E.M.K.). De gevoeligheid van het thermokruis is natuurlijk evenredig met de thermokracht per graad. De stroom i_m door de galvanometer is

$$i_m = \frac{E_{th}}{R_e + R_m},$$

waarbij R_e de inwendige weerstand van het thermoelement en R_m de weerstand van de meter is.

Aansluiting van het meetinstrument aan het thermokruis

Onze beschouwingen kunnen wij nu op twee manieren vervolgen.

a) Wij gaan uit van een bepaald thermoelement met de weerstand R_e, en vragen, welke meter wij moeten gebruiken, opdat bij een bepaalde primaire stroom i de grootste uitslag ontstaat. Daartoe berekenen wij de spanning op de meter:

$$E_m = E_{th} \frac{R_m}{R_m + R_e}\,; \quad \frac{E_m}{E_{th}} = \frac{R_m/R_e}{R_m/R_e + 1}\,. \quad (6)$$

Figuur 4 geeft de grafische voorstelling van (6). Geeischt wordt, dat de spanningsgevoeligheid van de meter (d.i. de uitslag bij een bepaalde spanning op de meter) zoo groot is, dat de meter met de uit (6) volgende spanning de gewenschte uitslag

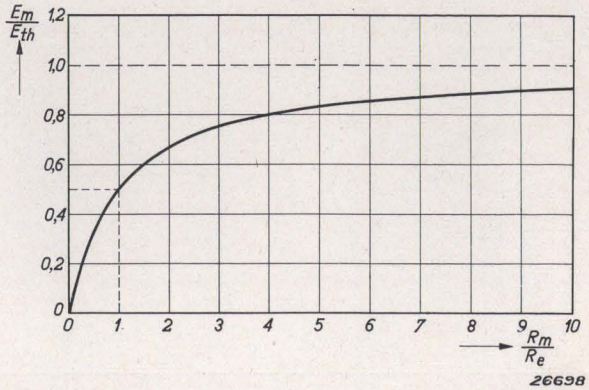


Fig. 4. Klemspanningsdaling van het thermoelement, wanneer door de meter stroom afgenomen wordt. Uitgezet is E_m/E_{th} als functie van R_m/R_e. Bij $R_m = R_e$ heeft de beste energieoverdracht plaats.

heeft. Indien $R_m = R_e$, geeft het thermokruis de meeste energie aan de meter af. Een meter met deze weerstand behoeft dus het minst energiegevoelig te zijn; het is dus meestal ook de goedkoopste meter. Een gevoeliger meter is echter even goed bruikbaar.

b) Wij gaan uit van een bepaalde meter, en vragen hoe het thermoelement geconstrueerd moet worden, opdat de uitslag van de meter het grootst is. Dit probleem is niet zoo eenvoudig. Het is duidelijk dat bij gegeven thermokracht, dus gegeven temperatuur van de laschplaats, de spanning op de meter het grootst is, wanneer de weerstand van het thermoelement nul is (zie *fig. 5a*, welke hetzelfde voorstelt als fig. 4, doch met andere abscis). Wij hebben echter gezien, dat de warmteafvoer door het thermoelement grooter wordt, naarmate de weerstand verlaagd wordt. Door grootere warmteafvoer door het thermoelement wordt de temperatuurverhooging van de laschplaats verminderd. De thermospanning vermindert dus, als de weerstand van het thermoelement verkleind wordt (zie *fig. 5b*). De combinatie van deze beide effecten wordt in beeld gebracht door *fig. 5c*, waarin de spanning op de meter uitgezet is als functie van de weerstand van het thermoelement, bij constante stroom door de gloeidraad. Gaan wij van een hooge waarde van de weerstand naar een lage waarde, dan stijgt eerst de stroom door de meter, omdat

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

de totale weerstand daalt, terwijl de thermospanning niet veel verandert; daarna daalt de stroom weer, omdat de thermospanning daalt, en dit effect sterker is dan de verdere daling van de totale weerstand. Fig. 5*c* geldt voor een bepaalde meterweerstand; heeft de meter een grootere weerstand, dan ligt het maximum naar rechts verschoven, is de weerstand kleiner, dan is het naar links verschoven.

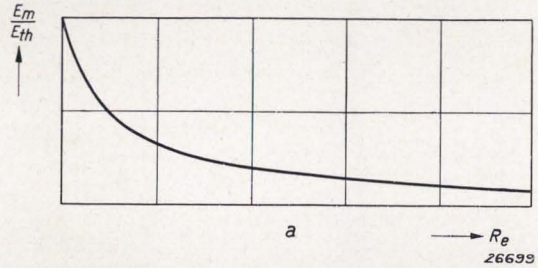


Fig. 5. *a*) Spanning op de meter als functie van de weerstand van het thermoelement, bij constante thermo-EMK.

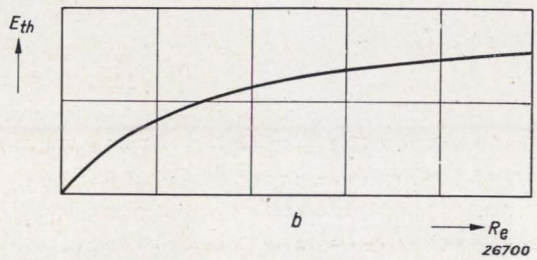


Fig. 5. *b*) Thermo-EMK als functie van de weerstand van het thermoelement, bij constante stroom door de gloeidraad.

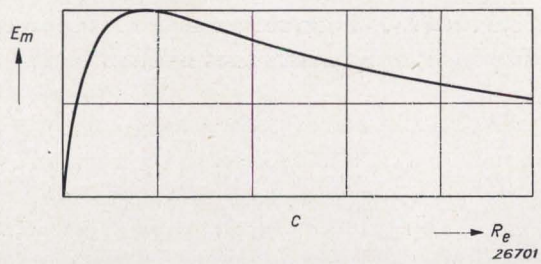


Fig. 5. *c*) Spanning op de meter als functie van de weerstand van het thermoelement, bij constante stroom door de gloeidraad.

Nadere behandeling van de karakteristiek van het thermokruis

Bij de afleiding van de formules is ondersteld, dat ϱ, λ en σ niet van de temperatuur afhangen. De afleiding geldt dus alleen voor kleine temperatuurverhoogingen. Zijn deze niet klein, dan moet de temperatuurafhankelijkheid van deze grootheden in rekening gebracht worden. In dat geval is de differentiaalvergelijking echter niet streng oplosbaar, zoodat de invloed van deze afhankelijkheid op andere wijze geschat moet worden. Zeer grof kan dit gebeuren, door de constanten in de oplossing van de differentiaalvergelijking eerst de waarde bij kamertemperatuur te geven, en vervolgens de waarde bij de temperatuur van het midden van de gloeidraad; het verschil tusschen beide uitkomsten geeft in elk geval aan, in welke richting afwijkingen te verwachten zijn. Wij bespreken dit voor de verschillende grootheden, die afhankelijk kunnen zijn van de temperatuur; bij elke grootheid afzonderlijk zal steeds blijken, dat het gevolg is, dat de karakteristiek niet zuiver kwadratisch meer is. In gunstige gevallen kunnen de afwijkingen, teweeggebracht door de grootheden afzonderlijk, elkaar compenseeren.

ϱ. De temperatuurcoëfficient van de soortelijke weerstand heeft voor verschillende materialen zeer verschillende waarden; ze is bijv. positief en ca. 0,4% per ° C voor koper, platina, ijzer, anderzijds practisch nul voor constantaan en manganin. Is ϱ positief, dan neemt de weerstand toe met toenemende stroom door de draad, zoodat bij groote stroom relatief te veel energie ontwikkeld wordt. De uitslag van de galvanometer zal dus sterker dan met het kwadraat van de primaire stroom varieeren.

λ. De temperatuurcoëfficient van het warmtegeleidingsvermogen is veel kleiner dan die van de electrische weerstand; ze is zwak negatief voor de zuivere metalen, en positief voor constantaan en manganin. In de practijk blijkt, dat de invloed hiervan klein is; de oorzaak is het reeds genoemde feit, dat een kleine waarde van λ eenerzijds maakt, dat de warmteisolatie van de gloeidraad goed is, anderzijds de warmteaanvoer naar het thermoelement verhindert. Een verandering van λ zal dus in eerste benadering alleen het temperatuurverloop langs de gloeidraad beinvloeden, maar niet de temperatuur van het midden. Dit geldt natuurlijk niet voor de warmteafvoer door het thermoelement, welke evenredig met het warmtegeleidingsvermogen van het thermoelement is. Hierbij heeft een positieve temperatuurcoëfficient tot gevolg, dat de uitslag minder sterk toeneemt dan met het kwadraat van de stroomsterkte.

σ. Voor de warmtestraling van een zwart lichaam geldt de wet van Stefan-Boltzmann, volgens welke de hoeveelheid energie, die per seconde en per cm² door het lichaam uitgestraald wordt, evenredig is met de vierde macht van de absolute temperatuur. Vindt de straling plaats in een omgeving met de temperatuur T_0, dan is de straling:

$$R = S\,(T^4 - T_0^4)\,\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2\ \text{sec}\ \text{graad}^4}\,.$$

Indien de in aanmerking komende temperatuurverschillen niet groot zijn, kan deze uitdrukking vervangen worden door:

$$R = S\,a\,(T - T_0) = S\,a\,\tau.$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

De grootheid a hangt nu echter van het temperatuurverschil af en wij kunnen in tweede benadering zetten:

$$a_\tau = a_0 (1 + \alpha \tau).$$

De constante α is tamelijk goed onafhankelijk van het temperatuurverschil en tusschen 20° C en 100° C gelijk aan + 0,6% per ° C. De temperatuurafhankelijkheid van σ heeft tot gevolg, dat de temperatuurverhooging kleiner is dan de formule aangeeft en dus dat de uitslag van de galvanometer minder dan evenredig met het kwadraat van de primaire stroom verandert.

Behalve de grootheden ϱ, λ en σ kunnen ook nog de thermokracht per graad, de weerstand van het thermoelement en de warmteovergangsweerstand van de gloeidraad naar de laschplaats van het thermoelement, van de temperatuur afhangen. In vele gevallen zal de temperatuurcoëfficient van de thermokracht verwaarloosd kunnen worden. De weerstand van het thermoelement vormt slechts een onderdeel van de weerstand van de meterkring, zoodat de invloed daarvan klein kan zijn. Het is zeer lastig een schatting te maken over de warmteweerstand van de verbinding tusschen gloeidraad en thermoelement en de wijze, waarop deze van de temperatuur afhangt; de invloed ervan wordt kleiner, naarmate de warmteweerstand van het thermoelement vergroot wordt. Toch is deze invloed bij slechte laschplaatsen zeer goed te constateeren, zoodat aan deze verbinding de grootste zorg besteed moet worden.

Uit bovenstaande beschouwing volgt, dat vooral de straling groote afwijkingen van het kwadratisch verloop van de karakteristiek kan veroorzaken. Het is dus gewenscht, dat de invloed van de straling zoo klein mogelijk gemaakt wordt. Nu hebben wij bij de discussie van de uitdrukking voor de temperatuur in het midden van de gloeidraad gezien, dat deze temperatuur bij gegeven weerstand van de gloeidraad onafhankelijk van de afmeting is. De straling is echter evenredig met het oppervlak van de draad; om de stralingsinvloed klein te maken, moeten dus de afmetingen klein gehouden worden.

Bij kleine waarde van K komt de stralingsconstante σ niet meer in de formules voor. De waarde van K is dus een maat voor de invloed van de straling. Nu is K evenredig met $l/\sqrt{d}$; de energiegevoeligheid anderzijds is evenredig met l/d^2. Bij constante energiegevoeligheid ($l/d^2 = C_1$) moet dus $C_1 d^{3/2}$ zoo klein mogelijk gemaakt worden; d moet dus klein zijn.

Hetzelfde geldt voor de afmetingen van het thermoelement. Draden met verschillende afmetingen, doch gelijke electrische weerstand, veroorzaken dezelfde warmteafvoer; als de afmetingen, dus het oppervlak, klein zijn, heeft de straling de kleinste invloed. Voor het maken van thermokruisen met een kwadratische karakteristiek moeten dus korte dunne draden gebruikt worden. Door deze maatregel wordt tevens de warmtecapaciteit van het thermokruis verkleind, waardoor de einduitslag van de meter sneller bereikt wordt. Aan het verkleinen van de afmetingen wordt echter een grens gesteld, omdat hierdoor de overbelastbaarheid ongunstig beinvloed wordt.

Overbelastbaarheid en gevoeligheid

Wij hebben gezien, dat de hoogste temperatuur van de gloeidraad niet in het midden van de draad ligt, maar ergens tusschen het midden en de polen. Wordt de stroom door de gloeidraad te groot gemaakt, dan zal de gloeidraad dus op die plaatsen doorbranden. Het is dus belangrijk, dat de verhouding van deze maximale temperatuur tot de temperatuur in het midden niet te groot is. Een maat voor deze verhouding, welke niet gemakkelijk te berekenen is, is de verhouding van de gemiddelde temperatuur van de draad tot de temperatuur van het midden. Deze verhouding is voor kleine waarden van K:

$$\frac{\bar{\tau}}{t_M} = \frac{2/3 - 4/15\ K^2 + \dfrac{2\,M}{\sqrt{\sigma \lambda u q}} (1/6\ K - 13/180\ K^3)}{1 - 5/12\ K^2}$$

Bij een bepaalde K (dus een bepaalde waarde van $l/\sqrt{d}$) wordt de verhouding grooter, als d verkleind wordt; de afhankelijkheid van d is echter kleiner naarmate K kleiner is. Verder is het duidelijk, dat een dunne draad bij een bepaalde temperatuur sneller beschadigd wordt dan een dikke; hier ligt dus een reden, om niet te dunne draden te gebruiken.

Bij thermokruisen voor groote stroomsterkten is K zoo klein, dat de maximale temperatuur vrijwel gelijk is aan de temperatuur van het midden, zoodat doorsmelten niet voorkomt. De thermokruisen kunnen echter nog op een andere wijze beschadigd worden, nl. als de kit, waarmee het thermoelement aan de gloeidraad bevestigd is, te warm wordt. Het is zeer moeilijk, een kitmateriaal te vinden, dat een hoogere temperatuur kan uithouden dan de gloeidraad.

De overbelastbaarheid van thermokruisen voor zwakke stroomen wordt dus bepaald door de verdampingssnelheid of het smeltpunt van de gloeidraad, die van de kruisen voor sterke stroomen door de eigenschappen van het kitmateriaal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

In direct verband met de overbelastbaarheid staat de opgave van de stroom, waarvoor het thermokruis bestemd is. Daar de mate van aantasting van de gloeidraad bij overbelasting afhangt van de tijdsduur, gedurende welke een bepaalde stroomsterkte door de draad gestuurd wordt, is het niet mogelijk een maximaal toelaatbare stroomsterkte op te geven, als niet tevens de tijdsduur vermeld wordt. Een geschikte maat is bijv. de stroom, waarbij het thermokruis zeker één minuut heel blijft (maximaal toelaatbare stroom). Daarbij wil men tevens graag de stroom weten, waarbij men het kruis continu kan gebruiken. In de practijk is het dan gewenscht om een nog lagere stroom te gebruiken, zoodat een veiligheidsmarge overblijft.

Bij de Philips-kruisen wordt opgegeven de stroomsterkte, waarbij de thermospanning 12 mV bedraagt; een thermokruis, dat bijv. bij 10 mA 12 mV levert, noemen wij een 10 mA-kruis. Verder wordt opgegeven de maximale stroom, waarbij het thermokruis nog continu gebruikt mag worden en de stroom, waarbij het thermokruis spoedig bezwijkt.

Men kan dus slechts spreken over een thermokruis voor een bepaalde maximale stroomsterkte; de stroom, waarbij de volle uitslag van de meter wordt verkregen, hangt van thermokruis en meter samen af.

Hierbij moet nog het volgende in het oog gehouden worden. Stel men heeft een bepaalde meter, en bijbehoorende thermokruisen voor 10 mA en 20 mA. De weerstanden van de gloeidraden van deze kruisen zijn respectievelijk 75 Ω en 23 Ω.Nu kan in een bepaalde schakeling de weerstand van het 10 mA-kruis te hoog zijn, bijv. als het kruis in een afgestemde kring moet worden opgenomen. In dit geval is misschien de weerstand van het 20 mA-kruis wel toelaatbaar. Dat kruis kan dan gebruikt worden, als een gevoeliger meter ter beschikking staat, welke, gebruikt met het 20-mA-kruis, reeds bij 10 mA de volle uitslag heeft. Zoo zal men in sommige gevallen niet een wijzerinstrument nemen, maar een zeer gevoelige spiegelgalvanometer, om daardoor een thermokruis met lage weerstand toch bij lage stroomsterkte te kunnen gebruiken.

Omkeereffect

De eerste geconstrueerde thermokruisen vertoonden een sterk omkeereffect; hiermee wordt bedoeld, dat de uitslag verandert, als de stroomrichting van de primaire gelijkstroom wordt veranderd. Dit verschijnsel kan twee oorzaken hebben.

a) Eén der oorzaken kan het Peltier-effect zijn. Dit is het omgekeerde van het thermoelectrisch effect. Wanneer door een thermoelement stroom gestuurd wordt, wordt de laschplaats kouder, als bij verwarming van de laschplaats een stroom in dezelfde richting zou ontstaan en omgekeerd. Het Peltier-effect is dus aanwezig bij het eerste thermokruis van Klemencic en eveneens bij de veelgebruikte brugschakelingen, die wij hier niet behandelen. Ook bij de moderne kruisen kan dit effect optreden als het thermoelement niet electrisch van de gloeidraad geisoleerd is en de lasch juist op de gloeidraad ligt (zie *fig. 6a*). Bij deze constructie doorloopt een deel van de primaire stroom eveneens de lasch van het thermoelement, waardoor het Peltier-effect ontstaat. Dit is te voorkomen door de laschplaats even naast de gloeidraad te leggen.

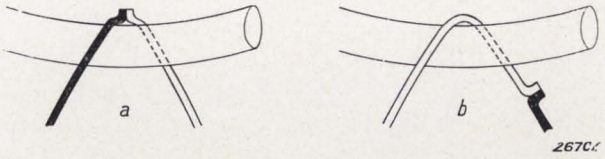


Fig. 6. *a*) Peltier-effect bij thermokruisen. De laschplaats van het thermoelement ligt op de gloeidraad en wordt dus door een deel van de gloeistroom doorloopen.
b) Omkeereffect bij thermokruisen. De laschplaats van het thermoelement ligt naast de gloeidraad, doch de gloeistroom gaat door een klein stukje van één der draden van het thermoelement.

b) Ook bij deze laatste constructie, kan nog een omkeereffect optreden (zie *fig. 6b*). Op de plaats, waar gloeidraad en thermoelement elkaar aanraken, zal steeds een deel van de primaire stroom ook door een deel van het thermoelement gaan. Door de weerstand ervan zal een spanningsverschil ontstaan, dat aanleiding geeft tot een kleine extra stroom door de meter, waarvan de richting omkeert, als de richting van de primaire stroom wordt omgekeerd. Om dit te vermijden moet het thermoelement geisoleerd worden van de gloeidraad; is dit het geval, dan is het omkeereffect verdwenen, en kan het thermokruis met gelijkstroom geijkt worden.

Snelheid van de aanwijzing

De einduitslag wordt bij een thermokruis niet snel bereikt. De hoofdoorzaak hiervan is, dat zich in gloeidraad en thermoelement een temperatuurevenwicht moet instellen. Omdat het thermoelement zelf niet door de primaire stroom doorloopen wordt, moet de verwarming van de gloeidraad uit door geleiding geschieden, waarvoor tijd noodig is. Er is een constructie mogelijk, waarbij het thermoelement tevens als gloeidraad dienst doet (zie *fig. 7*); hierbij wordt de warmte in elk volumeelement van het thermoelement ontwikkeld, waar-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

door maar weinig warmte door geleiding getransporteerd behoeft te worden. Op deze wijze is de aanwijzing zeer snel; een uitbreiding van deze constructie vormen de brugconstructies, waarbij een aantal thermoelementen tot een vierhoek vereenigd worden; het nadeel van deze methode is, dat een sterk Peltier-effect aanwezig is.

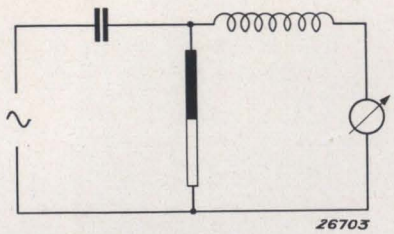


Fig. 7. Thermoelement met directe verhitting. De condensator is aangebracht, opdat de gelijkspanning, welke het element levert, niet door de wisselstroombron kortgesloten wordt. De zelfinductie is aangebracht, opdat de wisselstroom niet door de gelijkstroommeter gaat.

Zooals wij boven reeds opmerkten, heeft de warmtecapaciteit ook invloed op de snelheid van de aanwijzing; daarom zijn dus kleine constructies wenschelijk. Ook de weerstand van het thermoelement kan nog van invloed zijn op de snelheid van aanwijzing, doordat bij te kleine totale weerstand van de kring de instelling van de meter kruipend geschiedt.

Frequentieafhankelijkheid van de aanwijzing

De warmteontwikkeling in een draad is tot zeer hooge frequentie onafhankelijk van de frequentie van de verwarmende wisselstroom. Bij zeer hooge frequentie treedt echter het zg. „skineffect" op, waardoor de weerstand en dus ook de warmteontwikkeling grooter zijn dan bij lage frequentie. Voor de gebruikte draaddikten is de invloed hiervan pas merkbaar bij golflengten beneden 1 m, zoodat hiermee geen rekening behoeft te worden gehouden.

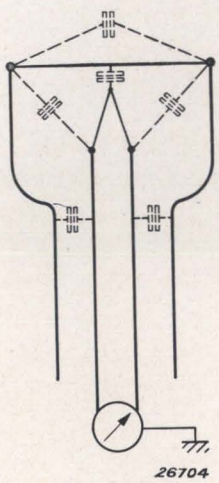


Fig. 8. Schema van een thermokruis met de verschillende parasitaire capaciteiten.

Anders staat het met invloeden van verschillende capaciteiten (zie *fig. 8*). De capaciteit, welke parallel aan de gloeidraad ligt, zal veroorzaken, dat van een bepaalde toegevoerde stroom een deel niet door de gloeidraad gaat, zoodat de aanwijzing te klein is. Dit wordt soms gecompenseerd door de zelfinductie van de gloeidraad. De capaciteit tusschen de toevoerdraden heeft hetzelfde gevolg. Verder is er capaciteit tusschen de gloeidraad en het thermoelement, dat door de galvanometer capacitief met aarde verbonden is. Deze capaciteit wordt nog vergroot door het feit, dat de toevoerdraden van de gloeidraad en die van het thermoelement in de kneep van de ballon en in de pennenhuls dicht bij elkaar zijn. Dit is gedeeltelijk te verhelpen, door bij metingen bij zeer hooge frequentie thermokruisen zonder pennen te gebruiken. Ook de derde soort capacitieve invloed, de capaciteit tusschen de toevoerdraden en aarde, wordt hierdoor sterk verminderd. Om deze laatste invloed te bestrijden is het absoluut noodzakelijk, dat één zijde van de gloeidraad geaard wordt.

De invloed van deze parasitaire capaciteiten wordt grooter, naarmate de weerstand van de gloeidraad hooger is. Een thermokruis met een gloeidraad van 20 Ω weerstand geeft bij 6 m golflengte binnen 1% betrouwbare aanwijzingen; wanneer het thermokruis zonder pennenhuls gebruikt wordt, is bij 3 m de aanwijzing nog binnen 1% betrouwbaar.

Voordeelen van het gebruik van thermokruisen

Tenslotte laten wij hier een opsomming volgen van de voordeelen, die aan het gebruik van thermokruisen verbonden zijn.

a) Gemeten wordt de effectieve waarde van de wisselstroom, omdat van de warmteontwikkeling gebruik gemaakt wordt, dus van een mechanisme, dat essentiëel kwadratisch van de stroomsterkte afhangt. Daarom wordt de meting zeer weinig beinvloed door de aanwezigheid van hoogere harmonischen in de te meten stroom en in het geheel niet door de phase van die harmonischen. Deze eigenschap hebben trouwens alle thermische instrumenten gemeen.

b) De aanwijzing is tot zeer hooge frequentie onafhankelijk van de frequentie van de te meten stroom.

c) Het energieverbruik is klein ten opzichte van dat van dynamometers en weekijzerinstrumenten.

d) Het kwetsbare gedeelte van de meetopstelling, het thermokruis zelf, is gemakkelijk verwisselbaar; hiervoor is ook de kwadratische, althans goed constante karakteristiek van belang.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Overzicht van de door Philips vervaardigde thermokruisen

De thermokruisen van Philips werden volgens bovenstaande overwegingen geconstrueerd. In *fig. 9* geven wij een foto van een volledig gemonteerd

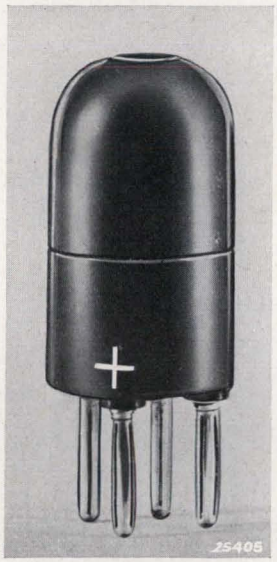


Fig. 9. Gemonteerd thermokruis.

thermokruis en in *fig. 10* een foto van het binnenwerk. Het afsluitkapje dient o.a. tot afscherming van warmtestraling van de omgeving. In de *tabel* vindt men een overzicht van de diverse eigenschappen van de thermokruisen. Van alle typen is de temperatuurcoëfficient van de weerstand van de gloeidraad klein; voor de meeste metingen behoeft er geen rekening mee gehouden te worden. De aanwijzing is vrijwel kwadratisch tot de helft van de gloeistroomsterkte, waarbij de thermospanning 12 mV is; de afwijking van het kwadratische verloop bedraagt in dit gebied hoogstens 2%, de thermospanning is bij die stroom ongeveer 4 mV, zoodat nog een volle uitslag ver-

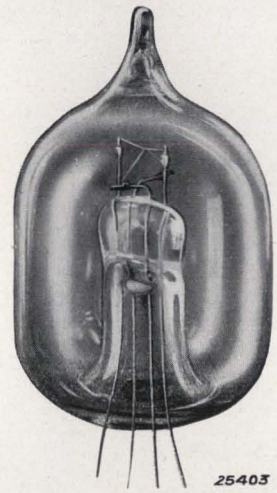


Fig. 10. Binnenwerk van een thermokruis.

kregen kan worden van gevoelige wijzerinstrumenten. Het thermoelement is electrisch van de gloeidraad gescheiden; de thermokruisen kunnen dus met gelijkstroom geijkt worden.

Type-nummer	12 mV EMK bij ca. mA	weerstand van de gloei-draad Ω	weerstand van het thermo-element Ω	continu-bedrijf tot mA	max. toelaat-bare stroom mA
Th1	10	75	5	15	20
Th2	20	23	3	30	40
Th3	40	7.5	3	75	100
Th4	100	2.2	3	150	200
Th5	200	1.1	3	300	350

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

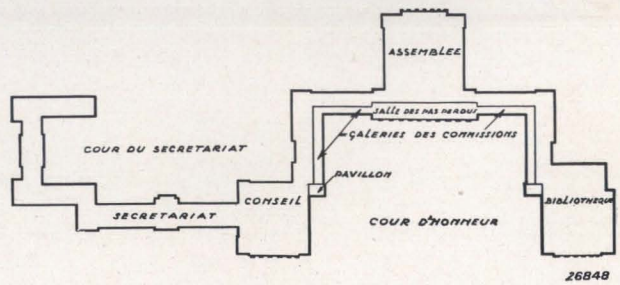
DE VERLICHTING VAN HET NIEUWE PALEIS VAN DE VOLKENBOND TE GENÈVE

door L. C. KALFF. 628.972

Het Volkenbondspaleis is bestemd voor de huisvesting van alle organen van den Volkenbond (behalve het reeds definitief ingerichte Bureau de Travail), die tot nu toe in een aantal gebouwen in Genève waren ondergebracht. De verschillende gedeelten dezer organisatie hebben uit de aard der zaak een sterk uiteenloopend karakter. Daar zijn administratieve gedeelten, die dagelijks gebruikt worden, vergaderzalen, die zoo nu en dan voor eenige weken of dagen het tooneel van bedrijvigheid zijn bij congressen en vergaderingen van internationale commissies, en een belangrijk gedeelte van het paleis is bestemd voor de zeer gewichtige en feestelijke bijeenkomsten in groot verband, waarvoor feestzalen en monumentale ruimten noodig zijn. Het uitgestrekte complex van gebouwen omvat, zooals op de plattegrond (*afb. 1*) is te zien, vier afdeelingen, nl. de kantoren van het Secretariaat, het gedeelte voor de Volkenbondsraad, dan in de hoofdas het representatieve gedeelte van de Assemblée met daar omheen de zalen voor de commissies en tenslotte nog de bibliotheek.

Het Secretariaat heeft voornamelijk een utiliteitsverlichting, waarvan de opzet grootendeels bepaald is door de dimensioneering van de leidingen. Deze is niet zeer ruim, zoodat in de kantoorlokalen die licht van kleur zijn, in hoofdzaak diffuse directe verlichting moest worden toegepast met per schrijftafel een diffusor (type DM; *afb. 2a*) met een lamp van 150 Dlm (111 W), waardoor op de schrijftafels ongeveer 65 lux wordt bereikt en tevens een voldoende algemeene verlichting is verkregen (*afb. 3*). Slechts in eenige lage zalen, waar de typisten zitten en waar men bij het toepassen van een directe verlichting te zeer beperkt zou zijn in het plaatsen der schrijftafels, werden indirecte armaturen (type WX, *afb. 2b*) toegepast met een gelijkmatige verlichting van ongeveer 110 lux. Men is hierdoor vrij in het plaatsen der schrijftafels (*afb. 4*). Des avonds maakt deze vleugel met de vele verlichte ramen een zeer fraaie indruk vanaf de „Cour du Sécrétariat", zooals men op het vignet boven dit artikel kan zien.

Ook in het gedeelte voor den Volkenbondsraad zijn de lokalen op dezelfde wijze verlicht, met uitzondering van eenige zalen, waarvoor in samenwerking met de architecten speciale plannen werden gemaakt. In de eerste plaats is daar de „Salle du



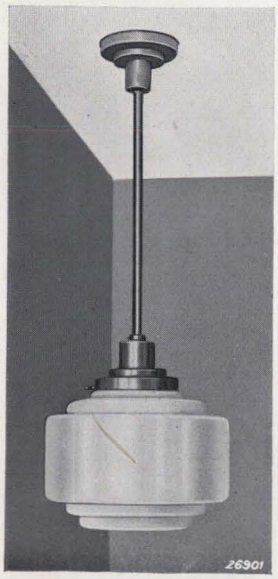
Afb. 1. Plattegrond van het paleis van den Volkenbond.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

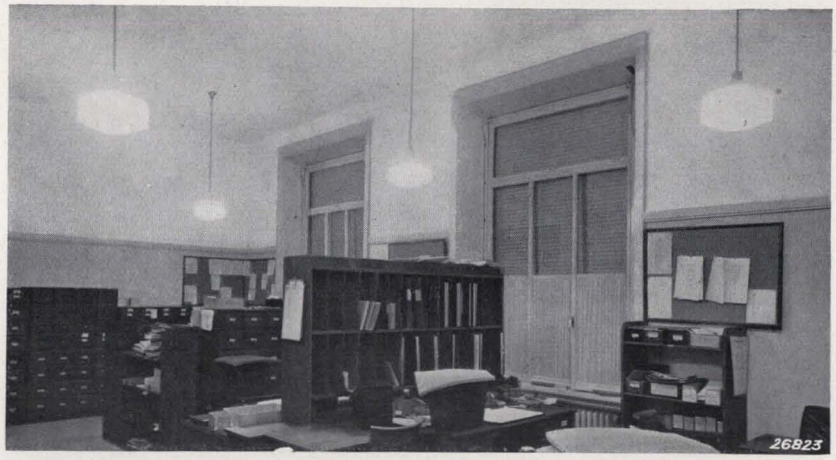
www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Conseil", die bijzonder moeilijke problemen stelde. De geheele zaal is uitgevoerd in gepolijst grijs marmer en zg. Camaïeu-schildering in grisaille op goudfond. Dus slecht reflecteerende donkere wanden en plafond, met plaatselijk sterk spiegelende oppervlakken. De eenig mogelijke verlichting bestond uit het aanbrengen van omvangrijke lichtornamenten met groote, diffuus lichtende oppervlakken van zoo klein mogelijke helderheid. Hiertoe construeerde Perzel uit Parijs, 2 m in diameter groote schalen in brons met dikke glazen ringen, waarachter de lampen in witte reflectoren werden opgesteld (*afb. 5*). De lichte gordijnen voor de vijf enorme ramen worden met zilverreflectoren van boven af decoratief verlicht, niet te sterk, daar anders de Raad, die met de rug naar de vensters zit, vanuit de zaal slecht, nl. alleen als silhouet, zichtbaar zou zijn.

De Commissiezalen zijn allen gelegen aan de ongeveer 160 m lange galerij, die 10 m hoog is. Deze galerij eindigt in vierkante paviljoens, die indirect worden verlicht door vier groote bronzen standaards van Perzel met gloeilampen van 500 W, die het plafond verlichten (*afb. 6*) en voorzien zijn van een



Afb. 2*a*) Diffusor DM.



Afb. 3. Verlichting met diffuseerende armaturen DM van een der kamers van het secretariaat van den Volkenbond.

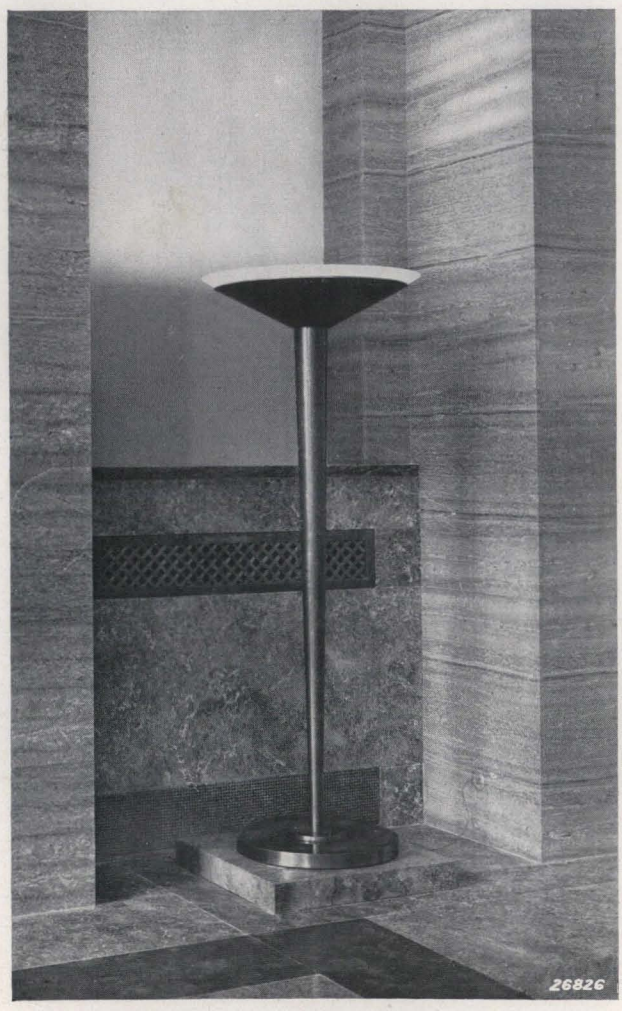
Afb. 4. Indirecte verlichting met armaturen WX; de plaatsing der schrijftafels is hierbij onafhankelijk van de verlichting.

Afb. 2*b*) Indirecte verlichtingsarmatuur WX.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

Afb. 5. Overzicht van de „Salle du Conseil".



Afb. 6. Groote bronzen standaard van Perzel voor indirecte verlichting met 500 watt lampen.

melkglazen rand ter vermijding van scherpe schaduwranden op de muren. Een indirecte verlichting met kleine 40 watt lampen op afstanden van 20 cm in een doorloopende verchroomde reflector vormt de hoofdverlichting van deze galerij. De Commissiezalen worden meest indirect verlicht uit gewelfde gedeelten van de plafonds (*afb. 7*). Hier worden in koven drie kleine parabolische verzilverde reflectoren per strekkende meter aangebracht op geheel van te voren gemonteerde rails. Iedere reflector heeft een lamp van 40 W, waardoor een zeer gelijkmatige, aangename verlichting werd verkregen. Voor iedere reflector moest nog een halfgematteerde bolle ruit gemonteerd worden, om lichtvlekken te vermijden, terwijl tevens het gereflecteerde licht uit de koven zelf deze gelijkmatigheid nog bevordert. Daar vele koven reeds vóór het lichtproject waren uitgevoerd, was het dimensioneeren van het verlichtingssysteem zeer moeilijk. In sommige gevallen moest dan ook, inplaats van de verzilverde reflectoren, een doorloopende verchroomde reflector gemonteerd worden, met vijf lampen per meter, teneinde een gelijkmatige verlichting te kunnen krijgen.

In het midden van de groote galerij ligt de „Salle des Pas Perdus" (*afb. 8*), die als foyer van de groote „Salle de l'Assemblée" bijzonder decoratief is behandeld. De donkere, gepolijst granieten vloer en de marmeren zuilen (*afb. 9*) gaven hier weer groote moeilijkheden. Tenslotte werd de hoofdverlichting geprojecteerd als een indirecte verlichting vanuit een ingebouwde koof op de galerij, die langs de 55 m lange zaal loopt (zie doorsnede *E* in afb. 8). Hier werden vijf reflectoren (type SC 170; *afb. 10*) per strekkende meter gemonteerd, die met 60 watt lampen het plafond verlichten. Om inkijken vanuit de galerij te beperken, werden tusschen de reflectoren witte metalen schotten aangebracht, terwijl het geheel stofdicht werd afgesloten met gebogen glazen platen, die licht zijn gesatineerd om lichtstrepen te elimineeren. De korte zijden van de lange zaal hebben geen reflectoren, om aan de einden geen lichtere plafondgedeelten te maken, maar voor de gelijkmatigheid van het geheel werden daar alleen naakte 40 watt lampen, vijf per strekkende meter, achter de gebogen glazen platen gemonteerd. Aan de raamzijden met negen enorme bronzen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

ramen van 12 m hoogte werd ieder raam omlijst met een bronzen profiel. In dit profiel (detail *D* in afb. 8) is een doorloopende rij buislampen („Philinea" 80 watt per strekkende meter) gemonteerd, met wit geëmailleerde reflectoren, die het witte, uit stuc geprofileerde, vlak tusschen de marmeren kolommen verlicht. Dit geeft een zeer statig en toch feestelijk karakter aan de zaal. In totaal waren hiervoor 9 maal 42 „Philinea" lampen van 50 cm lengte noodig (30 kW). Tusschen de ramen staan nog acht bronzen standaards (afb. 6) van Perzel met 500 watt lampen, die lichte accenten vormen (vgl. afb. 9).

Afb. 7. Indirecte verlichting van een der commissiezalen.

Afb. 9. Overzicht van de „Salle des Pas Perdus".

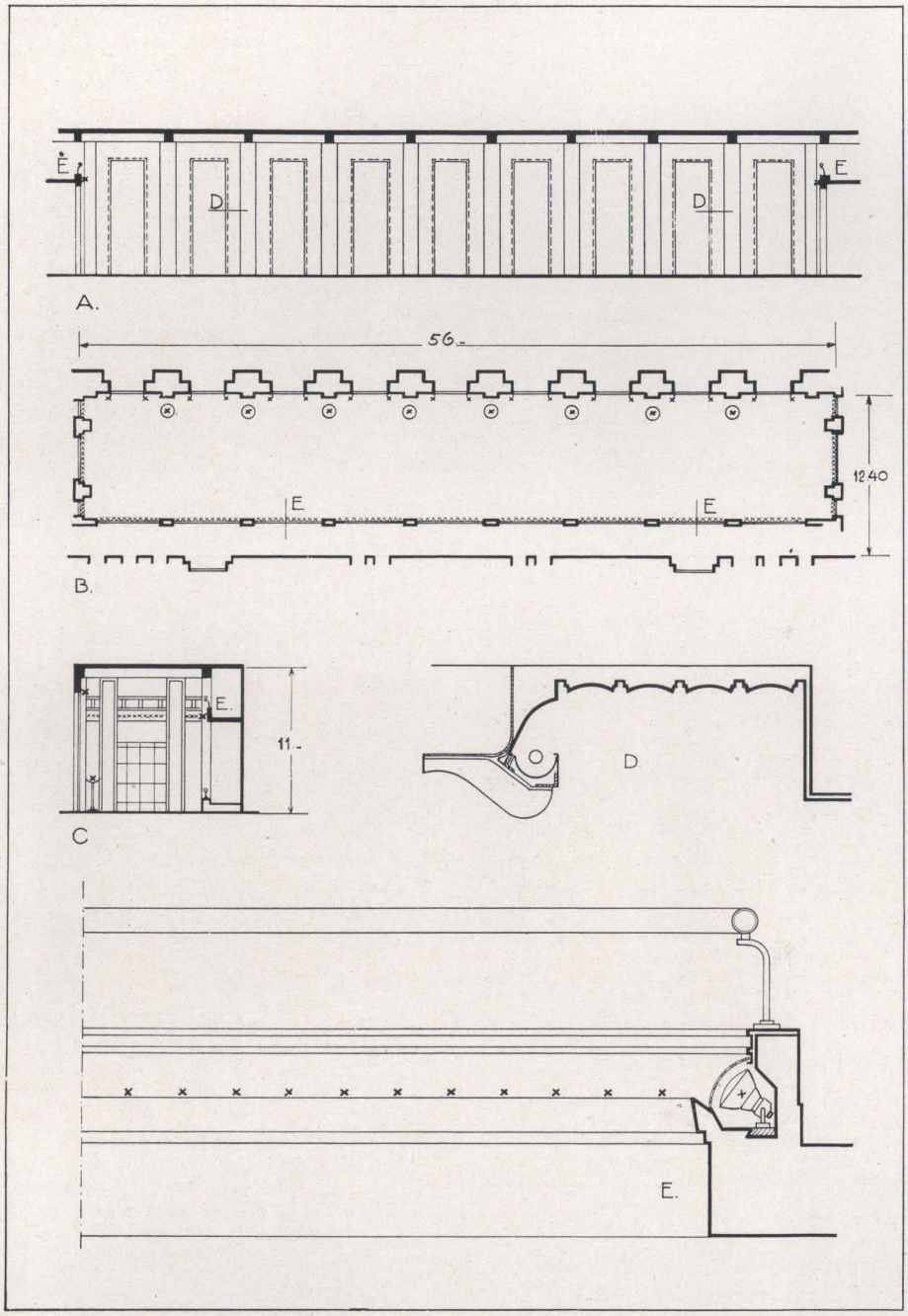
De groote „Salle de l'Assemblée" (*afb. 11*) stelde een bijzonder gecompliceerd probleem, doordat in deze reusachtige ruimte de verlichting geheel in de architectuur moest worden opgenomen (*afb. 12*) en zoowel op het podium en het spreekgestoelte, als in het parterre een zeer goede verlichting gewenscht was, terwijl op de twee, diep terug liggende, gaanderijen tevens pers en publiek de mogelijkheid van schrijven en lezen moesten hebben. De hoofdverlichting geschiedt op dezelfde wijze als de dagverlichting door 132 verzilverde reflectoren met lampen voor 300 W en 500 W boven het glazen middenstuk van het plafond. Dit bestaat uit zg. thermoluxglas, twee lagen helder glas met ertusschen een laag

Afb. 10. Reflector type S.C. 170 en type S.C. 130.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

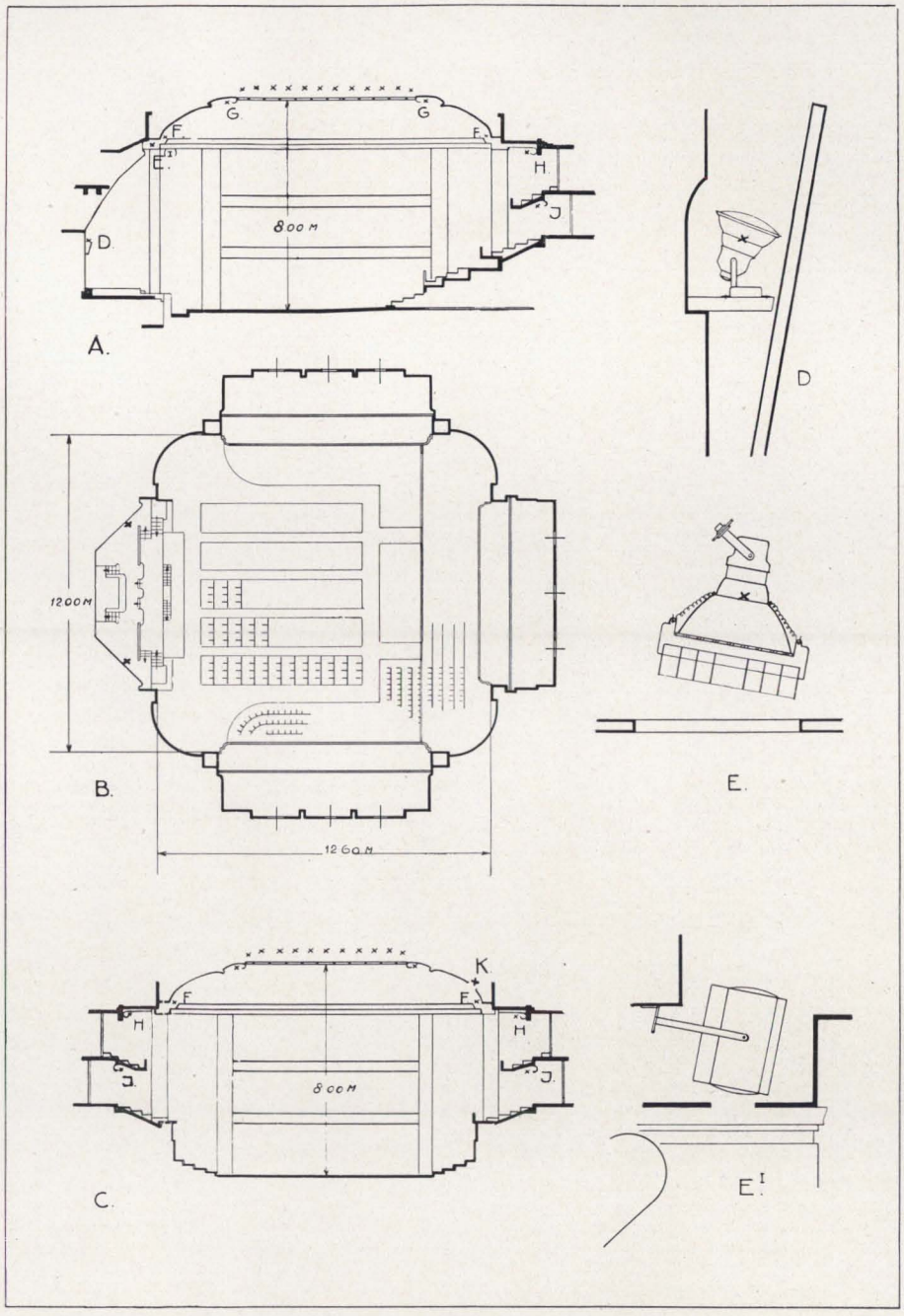
10/29/2023



Afb. 8. Constructieschema van de „Salle des Pas Perdus".
A lengtedoorsnede van de zaal,
B plattegrond van de zaal,
C dwarsdoorsnede van de zaal,
D horizontale doorsnede van de lichtkoven rondom de ramen,
E detail van de indirecte plafondverlichting op de gaanderij in verticale doorsnede.

Digitized in Heiloo the Netherlands
Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023



Afb. 11. Constructieschema van de „Salle de l'Assemblée".
A lengtedoorsnede van de zaal,
B plattegrond van de zaal,
C dwarsdoorsnede van de zaal,
D detail van de achterwand van het podium in verticale doorsnede,
E en E^I normale, resp. filmverlichting in de lichtkoof boven het podium; in fig. 12 als 4 lichte vlekjes te zien direct onder de luidsprekers.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

glaswol, die bijzonder fraai en goed diffuseerend is. Rondom deze glasoppervlakte loopt een vlakke witte band, die verlicht wordt door 25 watt lampen in een bronzen koof (bij *G* in afb. 11)

Afb. 12. Overzicht van de „Salle de l'Assemblée".

en daarbuiten een breede gebogen stucrand, die met een zachte, geluidabsorbeerende stof is bespoten. Deze rand wordt gelijkmatig verlicht door een rij verzilverde reflectoren met 150 watt lampen, verborgen in een koof van stuc, die uitwendig bladverguld is (bij *F* in afb. 11). Het onderhoud

Afb. 13. Verlichting van de zijgalerijen van de „Salle de l'Assemblée".

van deze lampen geschiedt boven de zaal op rijdende bruggen boven het glas en achter luiken voor de koven. Deze luiken zijn hoofdzakelijk noodig voor het ventilatiesysteem. De gewone verlichting van het podium geschiedt door vijf verzilverde reflectoren type SC 255 met 200 watt lampen, die erboven verborgen zijn in de vergulde koof. Tegen het inkijken uit de zaal zijn deze reflectoren van jalouzieën voorzien (detail *E* in afb. 11). Behalve deze gewone verlichting van het podium is er ook een filmverlichting aangebracht (detail E^I op afb. 11), die op afb. 12 als vier lichte vlekjes direct onder de luidsprekers is te zien. De marmeren achterwand van het podium heeft nog een kleine lichtgoot met 25 watt lampen in reflectoren type SC 130 (bij *D* in afb. 11), teneinde hier nog een lichtaccent op het hoofdmoment van de zaal te werpen. De gaanderijen hebben indirecte verlichting afkomstig van lange strooken plafond van wit stuc, die verlicht worden met 25 watt lampen in verchroomde metalen reflectoren (bij *H* en *I* in afb. 11).

Wij spraken hierboven over de filmverlichting. Het was een eisch om, ten behoeve van de filmreportage tijdens de vergaderingen en discussies, het podium met spreekgestoelte, maar ook bepaalde vakken in de zaal, waar de verschillende delegaties van de aangesloten landen zitten, voor het doen van opnamen tijdelijk zeer sterk te kunnen verlichten. Hiertoe moet, op voor de sprekers zoo min mogelijk hinderlijke wijze, wanneer men dat wenscht, voor eenige minuten het verlichtingsniveau tot 1500 lux en hooger op de te fotografeeren plaatsen kunnen worden opgevoerd. Boven het podium zijn daartoe vier vaste bundellichten met spiegel en condensorlenzen aangebracht met een vermogen van 3 kW elk. Deze verlichten de tafel van den voorzitter en het spreekgestoelte. Daar het licht van zeer hoog komt, is dit niet hinderlijk, echter moet vanuit de zaal nog zijlicht gegeven worden, omdat anders de belichting zeer slecht zal worden. Verder zijn in de zaal vijf ronde luiken aangebracht, die afgesloten kunnen worden (zie afb. 12 in het verlichte plafondgedeelte links). Achter deze luiken zijn vijf groote spiegelreflectoren opgesteld, twee ervan vast gericht op het podium en voorzien van lampen van 5 000 watt ieder en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

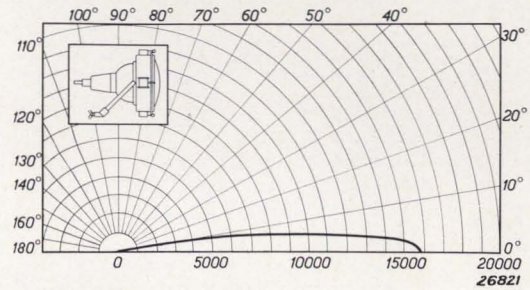
www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

drie spiegelreflectoren van 10 000 watt, die gericht kunnen worden op 25 verschillende vakken van het parterre van de zaal. Een operateur staat hiertoe in telefonische verbinding met de filmcabines, die onder de eerste galerij zijn aangebracht.

Afb. 15*a*) Armatuur FLC.

De zijgalerijen langs deze zaal hebben een gedeelte, dat indirect wordt verlicht vanuit een marmeren koof met 25 watt lampen in reflectoren type SC 130 (*afb. 13*). Deze lampen verlichten gelijkmatig het schuine gedeelte van het plafond, dat gevormd wordt door de onderzijde van de eerste gaanderij. De rest van deze ruimte wordt nog verlicht door vijf groote vierkante plafondornamenten van Perzel uit Parijs. Achter het witte diffuseerende glas zijn telkens 18 lampen van 65 watt gemonteerd.

Het zou te ver voeren hier alle zalen en ruimten nader te beschrijven. Wij willen daarom alleen nog de tijdelijke, o.a. bij de opening gebruikte, floodlightinstallatie van de groote gevel aan de „Cour d'Honneur" (*afb. 14*) bespreken. Men verlangde, dat op avonden van feestelijke



Afb. 15*b*) Lichtverdeelingskromme van een spiegelreflector FLC

bijeenkomsten de gevel goed verlicht zou zijn, nl. zóó, dat het gebouw ook over het daar reeds breede meer van Genève te zien zou zijn. Tevens was echter de opgaaf, dat de personen in het gebouw via de groote trappen de tuinen konden bereiken zonder verblind te worden. Het was natuurlijk moeilijk voor beide vragen samen een goede oplossing te vinden. De afbeelding 14 geeft het bereikte resultaat vrij goed weer.

Hiertoe werden drie verschillende batterijen van 24 spiegelreflectoren type FLC (*afb. 15*) met zoeklichtlampen van 1000 W opgesteld op het dak van de vleugel, die naar het Secretariaat leidt. Het ligt in de bedoeling hier in de toekomst een permanente installatie aan te brengen, die zoowel voor de aanblik van het gebouw op groote afstand als voor het verblijf in de „Cour d'Honneur" een goede verlichting levert.

Afb. 14. Verlichte gevel aan de „Cour d'Honneur".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

EENVOUDIGE INRICHTING VOOR HET METEN VAN DE SOORTELIJKE WEERSTAND VAN VLOEISTOFFEN

door A. CLAASSEN. 621.317.73 : 537.311.3

Een meetinrichting wordt besproken, die bestaat uit de eenvoudige universeele meetbrug „Philoscoop" [1]), een wisselstroomgenerator voor 1000 perioden/sec en een meetvaatje. Deze opstelling is vooral bedoeld voor het uitvoeren van in vele bedrijven geregeld verrichte contrôlemetingen van het geleidingsvermogen van vloeistoffen.

Meten van vloeistofweerstanden

In vele bedrijven moet geregeld het soortelijke geleidingsvermogen, d.i. het reciproke van de soortelijke weerstand, van vloeistoffen worden gecontroleerd. Dit kan bijv. het geval zijn met het afvalwater, het ketelwater en het spoelwater van wasscherijen, waar men wil nagaan, hoever het uitwasschen is gevorderd. In de suikertechniek beteekent het o.a. ook een vereenvoudiging om in plaats van het omslachtige bepalen van het aschgehalte der suiker over te gaan tot het meten van de soortelijke weerstand der suikeroplossing, die in onmiddellijk verband staat met het gevraagde aschgehalte.

In dit artikel wordt nu een inrichting voor het meten van de soortelijke weerstand besproken, waarin gebruik wordt gemaakt van de eenvoudige electrische meetbrug, die beschreven is in de vorige jaargang van dit tijdschrift. [1]) Het probleem der meting van de soortelijke weerstand komt neer op het meten van de vloeistofweerstand in een meetvaatje, dat met zekere standaardvloeistoffen geijkt is. Bij het meten van de soortelijke weerstand van vloeistoffen doet zich in de praktijk de moeilijkheid voor, dat men niet zoo gemakkelijk de juiste lengte en doorsnede van de te onderzoeken vloeistofkolom kan vaststellen. Plaatst men bijv. twee even groote electroden, waartusschen een potentiaalverschil ligt, op een bepaalde onderlinge afstand in een vloeistof, dan zullen de stroomlijnen niet volkomen parallel van de eene electrode naar de andere electrode loopen, maar er zal een zekere buiging van de stroomlijnen optreden, waardoor de werkzame doorsnede van de vloeistofkolom grooter wordt dan de doorsnede van de electroden zelf, tenzij men de doorsnede door een niet-geleider ruimtelijk begrenst. Heeft men echter van enkele vloeistoffen door middel van een vaatje, waarin men door bepaalde hulpmiddelen de buiging der stroomlijnen onmogelijk heeft gemaakt, de soortelijke weerstanden bepaald, dan kunnen deze vloeistoffen gebruikt worden voor het ijken van een constructief eenvoudiger vaatje, dat tevens meer aan de eischen van de practische meting is aangepast; met dit geijkte vaatje kan men dan soortelijke weerstanden van andere vloeistoffen op eenvoudige wijze meten.

Een verdere moeilijkheid is, dat men niet zooals bij een metalen geleider de weerstand met gelijkstroom kan meten. Bij het zenden van een gelijkstroom door een vloeistof tusschen twee daarin geplaatste electroden treden nl. veranderingen aan deze electroden op (bijv. gasontwikkeling en ontstaan van neerslagen), welke gepaard gaan met het optreden van bepaalde den stroom tegenwerkende potentiaalverschillen tusschen electrode en vloeistof. De tusschen de electroden aangelegde spanning komt dus niet overeen met het werkelijke potentiaalverschil tusschen de uiteinden van de vloeistofkolom en men kan uit aangelegde spanning en gemeten stroom de weerstand van de vloeistofkolom niet afleiden. Men noemt de hierbij optredende potentiaalverschillen polarisatiespanning, en het verschijnsel in het algemeen polarisatie.

De invloed der polarisatie gaat men tegen door de weerstand te meten met een wisselstroom van voldoend hooge frequentie. Als ook het meetvaatje geschikt is geconstrueerd, kan men de invloed der polarisatie practisch verwaarloozen, daar de polarisatiespanningen in de korte tijd, dat de stroom in een bepaalde richting doorgaat, geen gelegenheid hebben zich te vormen. Wij willen nu eerst de invloed der polarisatie in de wisselstroomkring wat nader onder het oog zien.

De ontledingsproducten, die zich tengevolge van de stroom aan de electroden vormen, geven daar aanleiding tot het ontstaan van een tegenwerkende electromotorische kracht V_p, die wij evenredig willen veronderstellen met de doorgestroomde hoeveelheid electriciteit q:

$$V_p = -Pq = -P\int i\,dt\,, \quad \cdots \quad (1)$$

hetgeen voor een niet te lage frequentie volkomen toelaatbaar is. Deze formule herinnert ons aan de

[1]) Vgl.: Philips techn. T. **2**, 270, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

formule voor de spanning V op een condensator C met een lading q:

$$V = -\frac{q}{C} = -\frac{1}{C}\int i\,dt\,. \quad \cdots \quad (2)$$

De polarisatiespanning V_p komt in haar gedrag dus geheel overeen met de spanning, die tusschen twee condensatorplaten ontstaat tengevolge van een lading q, als de capaciteit bedraagt:

$$C = \frac{1}{P}\,. \quad \cdots \quad (3)$$

Is R de weerstand van de vloeistofkolom, dan is het Ohmsche spanningsverlies iR en de spanning op de vloeistofcel wordt de som van iR en V_p. Het meetvaatje gedraagt zich dus als een serieschakeling (*fig. 1*) van een weerstand R en een

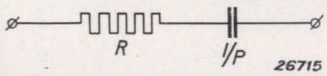


Fig. 1. Vervangingsschema voor het meetvaatje als onderdeel van een wisselstroomkring.

capaciteit, die gelijk is aan het reciproke van de polarisatiefactor P, zoodat haar impedantie voor sinusvormige wisselstroom met een cirkelfrequentie ω bedraagt:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{P^2}{\omega^2}}\,. \quad \cdots \quad (4)$$

De invloed der polarisatie is volgens formule (4) klein, als:

1) de frequentie hoog genoeg is,
2) de polarisatiefactor klein wordt gehouden, hetgeen kan geschieden door de electroden een groot oppervlak te geven, aangezien P daarmee omgekeerd evenredig is,
3) de weerstand van de vloeistof groot is.

Er dient verder voor te worden gezorgd, dat men met een zoo zuiver mogelijke wisselspanning meet. Voor de verschillende harmonischen zal nl. volgens formule (4) de impedantie van het meetvaatje, zoo gauw de polarisatie merkbaar is, niet meer onderling gelijk zijn. Dit beteekent, dat het dan niet mogelijk is om de meetbrug voor een niet-sinusvormige wisselstroom in evenwicht te brengen, daar de verschillende harmonischen een verschillende instelling zouden vragen.

De meetinrichting

De ontwikkelde inrichting voor het meten van vloeistofweerstanden bestaat uit:

1) de universeele meetbrug, „Philoscoop" type G.M. 4140 (*fig. 2*), die reeds eerder werd beschreven. [1])
2) een generator voor 1000 perioden: G.M. 4260 (*fig. 3*),
3) een meetvaatje G.M. 4221 (*fig. 4*).

Fig. 2. Universeele meetbrug „Philoscoop", type G.M. 4140.

Voor het gebruik van de meetbrug met een afzonderlijke generator voor 1000 perioden dient men de in de brug aanwezige meetspanning van de klemmen te verwijderen, waarbij natuurlijk de voeding der gloeikathoden en van het plaatspanningsapparaat gewoon uit het net blijft geschieden. Het generatorkastje G.M. 4260 geeft nu de mogelijkheid het bruggedeelte van de meetbrug te voeden met een vaste, van de netfrequentie onafhankelijke, frequentie van 1000 perioden, òf met de netfrequentie. Deze eerste frequentie is speciaal bedoeld voor het meten van vloeistofweerstanden, daar deze frequentie voldoende hoog is om bij de gebruikte constructie van de meetcel polarisatie practisch te kunnen verwaarloozen en anderzijds

Fig. 3. Generator G.M. 4260 voor het opwekken van wisselstroom met een frequentie van 1000 perioden per sec.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

nog geen hinder te hebben van schadelijke capaciteitsinvloeden. De oscillator-lamp in de generator is voorzien van een variabele lekweerstand, zoodat men door in te stellen op zwak oscilleeren er voor kan zorgen, dat bij elke belasting de wisselspanning zuiver sinusvormig wordt.

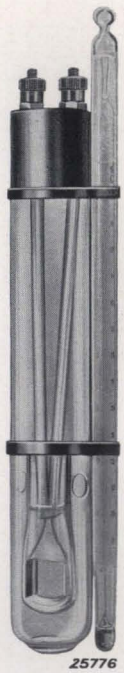


Fig. 4. Meetvaatje G.M. 4221 voor het meten van de soortelijke weerstand van vloeistoffen.

Het meetvaatje (zie fig. 4) is uitgevoerd als dompelcel. De platina-electroden, elk met ongeveer 1 cm² oppervlak, zijn verticaal geplaatst op een afstand van ongeveer 8 mm en met behulp van door het glas ingesmolten platinadraadjes verbonden met de koperen toevoerdraden, welke op hun beurt weer met de aansluitklemmen contact maken. De electroden zijn aan de buitenzijde geheel met opgesmolten glas bedekt en worden door een glazen brug onwrikbaar op hun plaats gehouden. De electroden zijn geheel beschermd door de stevige glazen buitenmantel van het meetvaatje. Deze buitenmantel heeft onderaan en op zij openingen om het vullen met vloeistof gemakkelijker te maken.

Aan deze wijze van plaatsen der electroden zijn de volgende voordeelen verbonden:

1) bij onderdompelen blijft geen lucht aan de electroden hangen, zooals bij horizontaal geplaatste electroden kan voorkomen, hetgeen grove fouten in de weerstandsbepaling zou kunnen opleveren.
2) de stroomlijnen in de vloeistof liggen geheel vast, daar ze begrensd worden door de glazen buitenwand, terwijl verder automatisch door het onderdompelen de vloeistof voldoende hoog boven de bovenrand der electroden komt te staan.

De soortelijke weerstand ϱ van een vloeistof is evenredig met de weerstand R van het meetvaatje gevuld met deze vloeistof en wel kunnen we schrijven:

$$\varrho = cR \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (5)$$

waarin c een voor het meetvaatje karakteristieke constante is (cel-constante).

Deze celconstante wordt bepaald door het meetvaatje te ijken met een oplossing van bekende soortelijke weerstand. De waarde van deze celconstante staat op de huls gegraveerd. (Gemiddeld bedraagt deze voor cellen van bovengenoemde constructie ongeveer 2).

Een hulpmiddel, dat van zeer veel belang is voor het practisch geheel opheffen der polarisatie is het z.g. platineeren der electroden. De electroden worden hierbij electrolytisch met een dun laagje platina-zwart (of platinaspons) bedekt, waardoor hun effectieve oppervlak vele malen vergroot wordt. Het platineeren der electroden heeft één nadeel, nl. dat het zeer fijn verdeelde platinaspons opgeloste stoffen uit de oplossing in sterke mate adsorbeert (vooral zuren en basen; in veel mindere mate zouten) en deze in verdundere oplossingen niet onmiddellijk weer afgeeft. Dit platineeren wordt speciaal aanbevolen voor het meten van oplossingen met een lage soortelijke weerstand. Heeft men alleen te maken met oplossingen van niet zeer lage soortelijke weerstand, bijv. grooter dan 1000 ohm cm, dan verdient het aanbeveling deze metingen met blanke electroden uit te voeren, waartoe het platina-zwart met koningswater kan worden opgelost; voor polarisatie behoeft men dan niet te vreezen.

Met op juiste wijze geplatineerde electroden is het mogelijk in het gebied, loopende van oplossingen met een soortelijke weerstand van ongeveer 20 ohm cm tot oplossingen met de hoogst voorkomende soortelijke weerstand (enkele 100 000 ohm cm), nauwkeurige metingen te verrichten. Bij oplossingen met een soortelijke weerstand kleiner dan 20 ohm cm treedt nog in geringe mate polarisatie op; deze zou slechts op te heffen zijn door zéér veel grootere platina-electroden te gebruiken en daardoor de cel zeer duur te maken, óf door de afstand der electroden zeer groot te maken, waardoor de cel ten eerste zeer lomp van vorm wordt en ten tweede de metingen bij hoogere soortelijke weerstanden niet meer nauwkeurig uit te voeren zijn. Men kan echter de invloed der polarisatie, welke zich uit in een kleiner worden

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

der celconstante (10-15%), in rekening brengen door de cel te ijken met oplossingen van zeer lage soortelijke weerstand, zooals bijv. maximaal geleidend zwavelzuur (s.w. 1,3 ohm cm) of verzadigde oplossing van keukenzout (s.w. 5 ohm cm). Indien de absolute waarde van het geleidingsvermogen in dit gebied er minder op aankomt, zijn relatieve metingen toch altijd nog met groote nauwkeurigheid mogelijk.

Bij het meten van het geleidingsvermogen van slecht geleidende oplossingen is het noodzakelijk het geleidingsvermogen van het gebruikte water in rekening te brengen. Is nl. het geleidingsvermogen van het water: χ_{H_2O}, het gemeten geleidingsvermogen van de oplossing $\chi_{opl.}$, dan is, hetgeen de opgeloste stof tot het geleidingsvermogen der oplossing bijdraagt:

$$\chi_w = \chi_{opl.} - \chi_{H_2O} .$$

Goed gedestilleerd water heeft een soortelijke weerstand van ongeveer 200000 ohm cm. Bij zeer zorgvuldig, onder uitsluiting van koolzuur, gedestilleerd water, kan men soortelijke weerstanden van 10^6 ohm cm bereiken.

De invloed van de temperatuur op de soortelijke weerstand van vloeistoffen is zeer groot. Bij practisch alle waterige zoutoplossingen wordt deze bij elke graad Celsius temperatuurverhooging 2,0 - 2,5% lager. Bij de meeste zuren bedraagt dit: 0,9 - 1,6%; bij loogoplossingen 1,9 - 2,0%. Voor nauwkeurige metingen moet men de temperatuur binnen 0,2° C kunnen bepalen.

HET ONDERZOEK VAN DE MACROSTRUCTUUR VAN GRONDSTOFFEN EN PRODUCTEN MET BEHULP VAN RÖNTGENSTRALEN. V

door J. E. DE GRAAF. 539.26

Wanneer een voorwerp ontstaan is als product van verschillende bewerkingen en dat voorwerp blijkt tenslotte fouten te bezitten, dan kunnen deze fouten bijv. ontstaan zijn in het materiaal en wel onafhankelijk van zijn vorm. Deze fouten treden het meeste op, als het materiaal via de vloeistoftoestand zijn uiteindelijke gedaante of plaats bereikt. Van de daarbij optredende holten en insluitsels zijn in deze serie voorbeelden gegeven bij de behandeling van het onderzoek van gegoten en gelaschte voorwerpen [1]). Verder kunnen de fouten ontstaan bij het geven van een bepaalde vorm aan het materiaal. De meer triviale fouten, die ontstaan, doordat bijv. bij het draaien niet de juiste maten zijn aangehouden, leveren zelden stof voor een röntgenonderzoek, omdat deze fouten meestal wel bij de inspectie voor het afleveren gevonden worden. Een bewerking, die echter zeker aanleiding tot röntgenonderzoek geeft, is het klinken, dat ook in deze serie werd behandeld [2]). Daarbij is er al op gewezen, dat fouten in de kristalstructuur, die bij deze bewerkingen op kunnen treden, niet vallen binnen het bereik van het absorptie-onderzoek.

[1]) Philips techn. T. **2**, 377, 1937; **3**, 93, 1938.
[2]) Philips techn. T. **2**, 350, 1937.

Fouten bij de montage

In bepaalde gevallen kunnen fouten ontstaan geheel zonder verandering van het materiaal en onafhankelijk van zijn vorm, door fouten bij de montage, dus bij de vereeniging van goede onderdeelen tot een geheel door middel van soldeeren, kitten, bevestigen met bouten, verbinden met draden, enz. Ook hier is het röntgenonderzoek weer bruikbaar om tijdig bij tusschenstadia foutieve stukken uit te ziften en om oorzaken van fouten in terugontvangen stukken op te sporen. Bovendien maakt het röntgenonderzoek een bepaalde bewerking soms pas als fabricagemethode mogelijk.

Een voorbeeld hiervan is de belangrijke plaats, die de röntgenfoto in de Philipsfabrieken inneemt bij het vervaardigen van röntgenbuizen en van be-

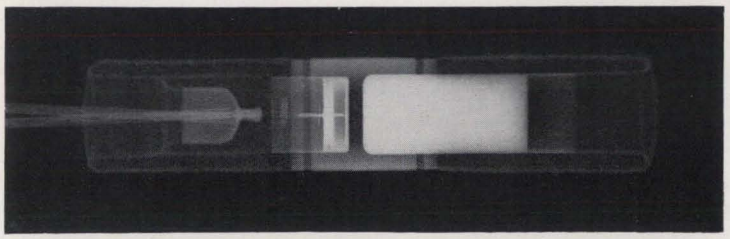


Fig. 1. Verkleinde röntgenfoto van een röntgenbuis; de onderlinge stand en afstand van de electroden in de chroomijzeren kan is pas op de röntgenfoto te zien.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

paalde zendlampen. De constructie van beide wordt gekenmerkt door de toepassing van een optisch ondoorzichtige chroomijzeren kan, waarin de vitale

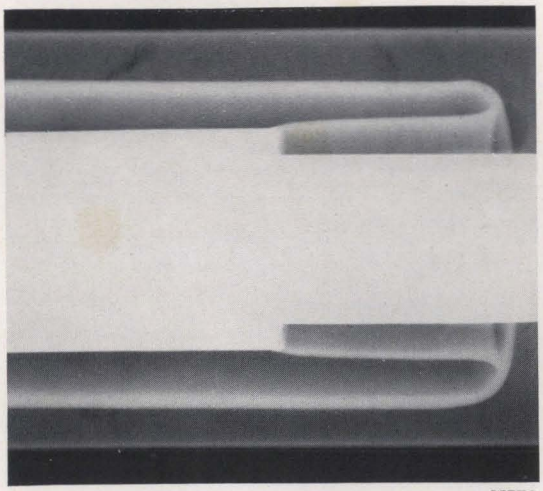


Fig. 2. Met onbruikbare kit gemonteerde steker voor het aansluiten van een hoogspanningskabel op een röntgenbuis (gasbellen en scheuren in de kit).

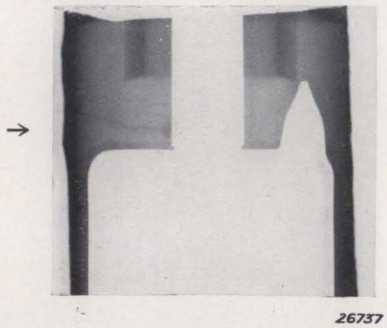


Fig. 3. Doorslag in een steker voor het aansluiten van een hoogspanningskabel op een röntgenbuis. De oorzaak (een gasbel in de kit) en het verloop van het doorslagkanaal zijn duidelijk te zien (bij →).

deelen zijn geborgen. Deze zijn dan verder met glas hoogvacuumdicht aan de kan gesmolten. *Fig. 1* geeft de verkleinde röntgenfoto van een röntgenbuis weer. Aan de hand van deze foto kan pas nauwkeurig worden nagegaan, of de electroden de goede afstand en stand ten opzichte van elkaar bezitten. Hetzelfde gebeurt bij de fabricage van zendlampen, waar bovendien de röntgenfoto nog wordt gebruikt om een eventueele verandering van de stand der electroden op te merken, die door de schokproef ontstaan zou kunnen zijn [3]).

Een ander belangrijk gebied van toepassingen voor contrôle der montage vormen bijv. hoogspanningsisolatoren en -kabels. Tusschen de onderdeelen hiervan mogen geen luchtholten voorkomen, omdat bij de hier toegepaste, groote veldsterkten deze holten door hun ionisatie een doorslag inleiden. Daarom worden de onderdeelen aan elkaar bevestigd met kit, waarin echter soms gemakkelijk gasbellen ontstaan. *Fig. 2* toont de gasbellen en zelfs scheuren in een met een geheel onbruikbare kit bevestigde steker voor het aansluiten van een hoogspanningskabel op een röntgenbuis. *Fig. 3* laat zien, hoe de electrische doorslag van een dergelijke steker op de foto tot uiting komt. Men krijgt hier de oorzaak van de doorslag (een luchtbel in de kit) te zien, die bij uitsmelten spoorloos zou verdwijnen. Bij uit kunsthars vervaardigde voorwerpen maakt de röntgenfoto [4]) het nog mogelijk om de goede ligging van ingeperste metalen deelen te controleeren.

Een derde gebied van toepassingen is het onderzoek van electrische toestellen. Het kan hier zoowel gaan om een eenvoudig snoer, waarin een ader gebroken is, als om ingewikkelde toestellen, die uit vele onderdeelen bestaan. Zoo kwam in het filter van *fig. 4* een kortsluiting voor, die telkens verdwenen bleek te zijn na het uitsmelten van de was, maar na het volgieten weer optrad. Door middel van een röntgenfoto, die in de laatste toestand genomen werd, kon de kortsluiting opgespoord worden. Ook verbroken of slecht

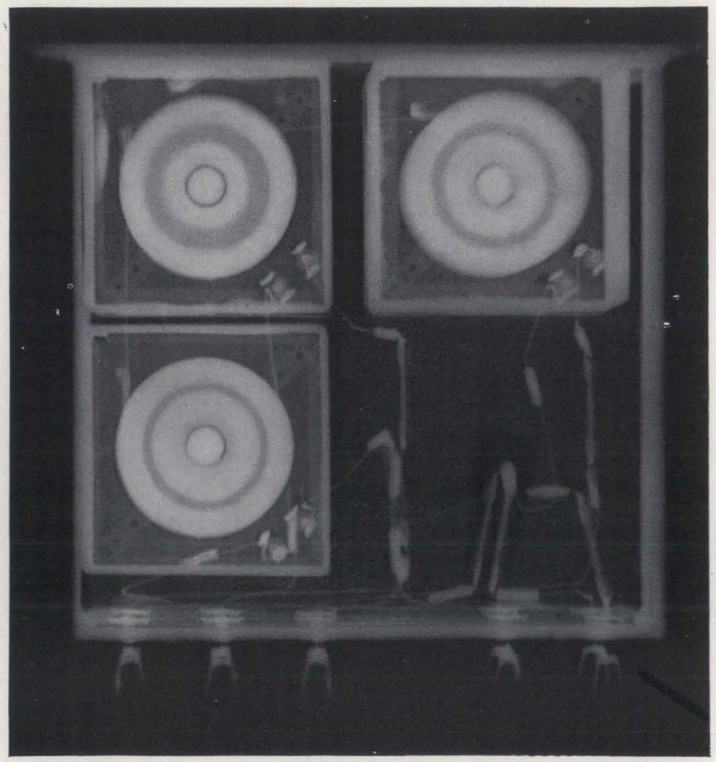


Fig. 4. Electrisch filter. Kortsluitingen, slechte soldeerplaatsen en luchtbellen in de gietmassa (donkere vlek rechts onder) kunnen op een dergelijke foto waargenomen worden.

[3]) Philips techn. T. **2**, 115, 1937.

[4]) Vgl.: Philips techn. T. **1**, 261, 1936.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 10/29/2023

gesoldeerde contacten, voorzoover zij niet uit de werking van het toestel reeds duidelijk zijn, kunnen vaak het eenvoudigst op een röntgenfoto gevonden worden. Hoe de goede ligging van spoelen in een bus door impregneeren geleden kan hebben, toont *fig. 5*: de primaire spoel van een transformator is bij deze behandeling uit de secundaire spoel gezakt, zoodat de transformator niet meer behoorlijk werkte.

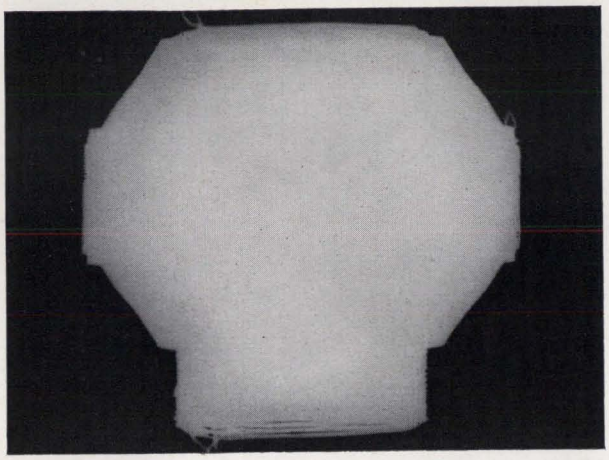


Fig. 5. De primaire spoel van een in zijn huis geïmpregneerde transformator is uit de secundaire wikkeling gezakt, zooals deze röntgenfoto van de beide spoelen in hun onderlinge ligging duidelijk laat zien. De ijzeren kern is weggenomen.

En ten slotte vindt contrôle van de montage met behulp van röntgenstralen nog plaats in de mechanische industrie. Uiteraard zijn het hier meer de fijne toestellen, waarvoor een contrôle noodig is, dan de groote machines. Een voorbeeld geeft *fig. 6* in de vorm van een carburator, waaraan een détail als de ligging van benzinetoevoerpijpen zeer duidelijk is te zien. De aanwezigheid en stand van stuitpennetjes, het goede vastzitten van moeren en de aanwezigheid van moerzekeringen zijn andere voorbeelden van toepassingen der röntgencontrôle op dit gebied.

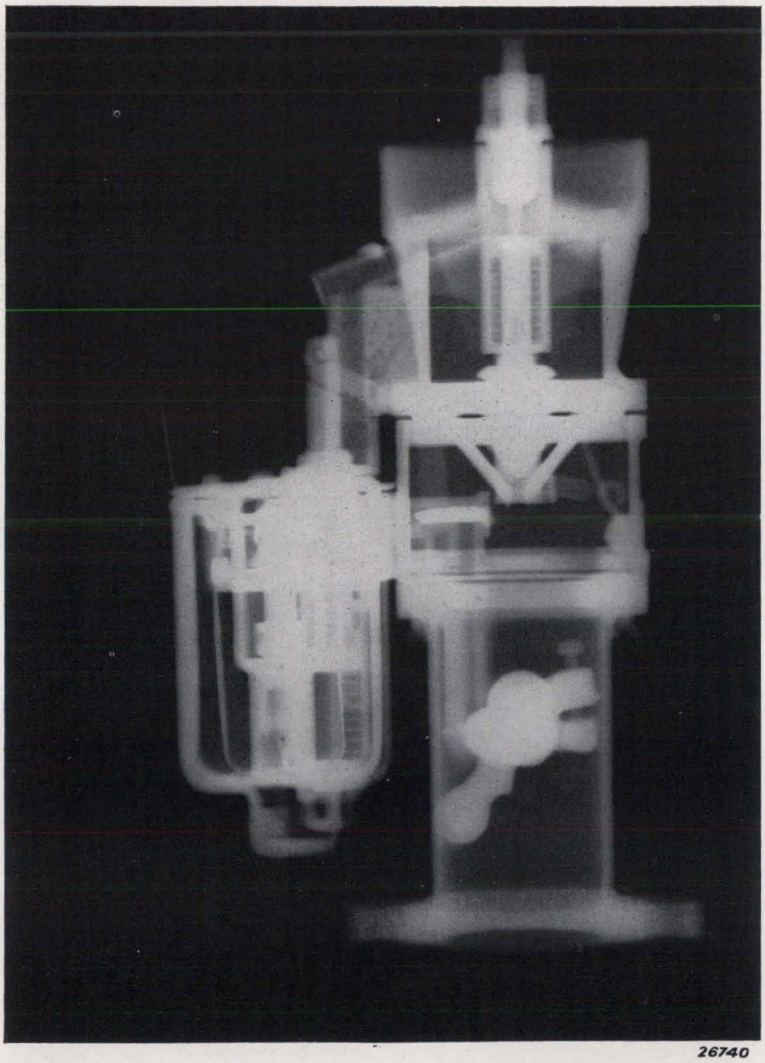


Fig. 6. Röntgenfoto van een carburator, waaraan vele details van een dergelijke ingewikkelde constructie nog duidelijk zijn waar te nemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!